



**Ana Catarina Duarte Pereira Botelho Guerra**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**Caraterização reológica e avaliação da  
resistência à fadiga de mastiques  
betuminosos com o reómetro de corte  
dinâmico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Rui Micaelo  
Co-orientador: Professora Doutora Maria Teresa Cidade

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando Henriques

Arguente: Prof<sup>a</sup>. Doutora Catarina Leal

Vogal: Prof. Doutor Rui Micaelo



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Maio, 2015**



*“Copyright”* Ana Catarina Duarte Pereira Botelho Guerra, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador científico Professor Rui Micaelo, pelo apoio, disponibilidade e partilha de conhecimentos prestados, os quais foram fundamentais para a elaboração do presente trabalho.

À co-orientadora Professora Maria Teresa Cidade, pela disponibilidade, partilha de conhecimentos no que concerne à permissão e utilização do equipamento de ensaio usado durante a elaboração da parte experimental do estudo.

Ao Engenheiro André Pereira pelo apoio, amizade, partilha de conhecimentos e por ter auxiliado nos primeiros momentos de execução de procedimento experimental tanto em laboratório como no equipamento de ensaio.

Aos meus colegas André Moreno e Diogo Resende por me terem auxiliado na preparação das amostras betuminosas.

Às empresas Probigalp – Ligantes Betuminosos, S.A., Eurocálcio e SECIL, pelo fornecimento dos materiais requeridos no âmbito deste estudo.

Aos meus colegas e amigos que me apoiaram, em particular, à Carla Gil, João Serafim, João Valadares, João Nabais, Iris Perdiz, Samuel Guerreiro e Filipa Serra pela sua amizade e apoio.

E, por fim, um profundo agradecimento à minha família, em particular aos meus pais e ao meu irmão, pela contínua motivação e incentivo prestados durante todo o meu percurso académico.



## Resumo

Numa mistura betuminosa, o masticue betuminoso envolve os agregados grossos e preenche os vazios do esqueleto mineral, influenciando deste modo as propriedades da mistura durante a produção (ex: trabalhabilidade) e em serviço (ex: estabilidade).

O presente estudo pretende investigar e avaliar o comportamento reológico e mecânico do masticue na gama de temperaturas a que um pavimento flexível está sujeito em serviço. O comportamento mecânico é avaliado através da resistência à fadiga. Oito mastiques foram formulados com dois betumes, um puro e outro modificado com polímeros SBS, e dois fíleres para duas relações volumétricas. Os resultados experimentais foram analisados e comparados com os obtidos em outro estudo relativos à caracterização dos betumes (Pereira, 2014).

Os ensaios de caracterização reológica foram realizados num reómetro rotacional, em regime oscilatório e utilizando uma geometria de pratos paralelos. As propriedades utilizadas para a caracterização reológica são o módulo complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ).

Os ensaios de avaliação da resistência à fadiga foram implementados no reómetro rotacional. Realizaram-se ensaios de fadiga a deformação controlada, contínua e descontínua, por forma a avaliar a capacidade auto-regeneradora dos mastiques, e ensaios com incremento sucessivo de deformação. A avaliação dos resultados de vida de fadiga foi feita com base na abordagem tradicional (50% redução módulo inicial) e na abordagem de energia dissipada.

Os resultados de caracterização reológica mostram que a adição de fíler no betume contribui para um endurecimento do masticue, através do aumento de  $G^*$ , onde o masticue modificado com maior teor em fíler com cal hidráulica apresenta um melhor comportamento reológico, por ser fíler ativo. No entanto, mastiques com calcário possuem uma maior resistência à fadiga, devido à granulometria fina do fíler. Constata-se que mastiques modificados contribuem para uma maior vida de fadiga, devido à adesão interfacial entre fíler-polímero.

Palavras-chave: Masticue betuminoso, Fíler mineral, Comportamento reológico, Resistência à fadiga, Capacidade auto-regeneradora, Reómetro de corte dinâmico





## Abstract

In the bituminous mixture, the mastic involves the coarse aggregates and fills the voids of the mineral skeleton, thereby influencing the properties of the mixture during processing (eg. workability) and service (eg. stability).

This study aims to investigate and evaluate the rheological and mechanical behavior of the mastic in the temperature range at which a flexible pavement is subject in service. The mechanical behavior is assessed with the resistance to fatigue. Eight mastics were formulated with two bitumens and two fillers for two volumetric ratios. The experimental results were analyzed and compared with those obtained in a previous study (Pereira, 2014).

The rheological characterization tests were performed on a rotational rheometer, in oscillatory regime using parallel plate geometry. The properties used for rheological characterization were the complex modulus ( $G^*$ ) and phase angle ( $\delta$ ).

Evaluation tests of fatigue strength were implemented in the rotational rheometer. Controlled deformation fatigue tests, continuously and discontinuously, were performed in order to assess the ability of self-regeneration of mastics, as well as successive trials with increasing deformation. Assessment of fatigue life results was based on the traditional approach (50% reduction of the initial modulus) and the dissipated approach.

The rheological characterization results show that the addition of filler into the bitumen leads to a hardening of the mastic translated by the increase of  $G^*$ , where the modified mastic with a higher content of hydrated lime presents a better rheological behavior, due to being an active filler. However, limestone based mastics have a higher fatigue strength due to the fine graduation filler. It is noticed that modified mastics have a higher fatigue life which may be related with the interfacial adhesion between filler-polymer.

**Keywords:** Bituminous mastic, Filler, Rheological behavior, Fatigue resistance, Self-healing capacity, Dynamic shear rheometer



# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Organização do estudo .....	4
2. Revisão da literatura .....	5
2.1. Considerações gerais.....	5
2.2. Constituição do mastique betuminoso .....	5
2.2.1. Ligante betuminoso .....	6
2.2.2. Fíler mineral.....	7
2.3. Interação fíler-betume .....	9
2.3.1. Compacidade do fíler .....	10
2.3.2. Modelos reológicos das suspensões fíler-betume .....	13
2.4. Resistência ao fendilhamento por fadiga do mastique betuminoso.....	24
2.4.1. Abordagens de avaliação da resistência à fadiga.....	25
2.4.1.1. Critério tradicional de falha.....	26
2.4.1.2. Taxa de variação de energia dissipada .....	26
2.4.1.3. Abordagem do dano contínuo viscoelástico .....	28
2.4.2. Ensaio de fadiga em mastiques betuminosos usando Reómetro de Corte Dinâmico 30	
2.4.2.1. Ensaio de fadiga a deformação controlada .....	31
2.4.2.2. Ensaio de fadiga a incremento sucessivo de deformação .....	33
3. Estudo experimental .....	35
3.1. Materiais utilizados .....	35
3.1.1. Ligantes betuminosos.....	35
3.1.2. Fíleres.....	37
3.1.3. Mastiques betuminosos .....	38
3.2. Preparação dos provetes de ensaio de mastique betuminoso .....	40
3.3. Reómetro rotacional .....	41
3.4. Ensaio de caracterização reológica dos mastiques betuminosos .....	44
3.4.1. Ensaio de varrimento de deformação.....	45

3.4.2.	Ensaio de varrimento de frequência .....	45
3.5.	Ensaio de avaliação da resistência à fadiga dos mastiques betuminosos .....	46
3.5.1.	Ensaio de fadiga a deformação controlada .....	47
3.5.2.	Ensaio de fadiga com incremento sucessivo de deformação .....	48
4.	Apresentação e discussão de resultados .....	49
4.1.	Resultados dos ensaios de caraterização reológica dos mastiques betuminosos .....	49
4.1.1.	Limites Viscoelásticos Lineares .....	49
4.1.2.	Representação das propriedades reológicas .....	51
4.1.2.1.	Curvas isotérmicas .....	52
4.1.2.2.	Curvas isócronas .....	55
4.1.2.3.	Diagramas de Black .....	58
	• Influência no tipo de ligante betuminoso .....	58
	• Influência no tipo de fíler .....	59
	• Influência no conteúdo em fíler .....	59
4.1.2.4.	Curvas mestras .....	59
	• Influência no tipo de fíler .....	63
	• Influência no conteúdo em fíler .....	64
4.1.3.	Modelos reológicos .....	64
4.1.3.1.	Modelos micromecânicos .....	65
4.1.3.2.	Modelo concetual de Faheem .....	67
4.1.3.3.	Modelo 2S2P1D .....	69
4.1.4.	Efeito da rigidez do fíler mineral no sistema fíler-betume .....	70
4.2.	Resultados dos ensaios de fadiga dos mastiques betuminosos .....	71
4.2.1.	Ensaio de fadiga a deformação controlada .....	71
4.2.1.1.	Avaliação da resistência à fadiga pela abordagem tradicional .....	72
	• Influência no tipo de ligante betuminoso .....	74
	• Influência no tipo de fíler .....	74
	• Influência no conteúdo em fíler .....	75
4.2.1.2.	Avaliação da resistência à fadiga pela abordagem da energia dissipada .....	75
	• Influência no tipo de ligante betuminoso .....	77
	• Influência no tipo de fíler .....	79

• Influência no conteúdo em fíler .....	80
4.2.2. Ensaios de fadiga com incremento sucessivo de deformação .....	81
4.2.2.1. Resultados de varrimento de frequência.....	81
4.2.2.2. Resultados de varrimento de deformação .....	82
5. Considerações finais .....	87
5.1. Conclusões.....	87
5.2. Desenvolvimentos futuros .....	89
Referências bibliográficas .....	91
Referências normativas.....	95
Apêndice A – Cálculo da relação fíler-betume usado na formulação do mastique betuminoso	97
Apêndice B – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do B/NHL5_20%.....	99
Apêndice C – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do B/RC480_20%..	101
Apêndice D – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do P/NHL5_20%....	103
Apêndice E – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do P/RC480_20% ..	105
Apêndice F – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do B/NHL5_33% ....	107
Apêndice G – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do B/RC480_33% .	109
Apêndice H – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do P/NHL5_33%....	111
Apêndice I – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do P/RC480_33% ...	113
Anexo A – Certificado de qualidade do betume 35/50.....	115
Anexo B – Certificado de qualidade do betume modificado PMB 45/80-65 .....	117
Anexo C – Declaração de conformidade CE do fíler NHL5 .....	119
Anexo D – Declaração de conformidade CE do fíler RC480 .....	121
Anexo E – Declaração do LNEC quanto ao valor do volume de vazios do fíler RC48.....	123



## Índice de figuras

Figura 1.1 – Esquema da representação do betume fixo e do betume livre num mastique betuminoso .....	1
Figura 2.1 – Influência da concentração de fíler no módulo complexo nos mastiques betuminosos .....	10
Figura 2.2 – Ilustração do betume livre e betume fixo, onde: a) mastique com insuficiente betume para preencher os vazios; b) mastique com vazios preenchidos pelo betume; c) mastique com betume livre adicionado, separando partículas de fíler individualmente .....	12
Figura 2.3 – Esquema da representação do betume fixo e do betume livre num mastique betuminoso .....	12
Figura 2.4 – Representação esquemática duma suspensão de compósito fíler-matriz .....	14
Figura 2.5 – Viscosidade relativa em função da fração de volume prevista pela equação de Einstein para suspensões diluídas de esfera dura rígida e pela equação de Krieger e Dougherty para suspensão concentrada de esfera dura rígida .....	16
Figura 2.6 – Efeito da alteração de $\varphi_m$ e de $K_E$ .....	17
Figura 2.7 - Curva entre o módulo complexo relativo e a fração de partículas em volume dos compósitos gel, segundo expressão modificada de Kerner, com $\varphi_m = 0,6$ , sob diferentes valores de módulo complexo relativo das partículas de fíler .....	18
Figura 2.8 – Camadas de fluido circundantes à partícula de fíler .....	18
Figura 2.9 – Representação da evolução de rigidez do mastique em termos de influência do fíler .....	20
Figura 2.10 – Representação do modelo generalizado “2S2P1D” .....	22
Figura 3.1 - Esquema ilustrativo do reómetro usando a geometria de pratos paralelos .....	42
Figura 4.1 – Limites de deformação linear ( $\gamma_{lim}$ ) dos mastiques e betumes estudados .....	49
Figura 4.2 – Valores de deformação limite ( $\gamma_{lim}$ ) dos mastiques e dos betumes em função da temperatura .....	51
Figura 4.3 – Curvas isotérmicas do módulo complexo dos betumes e mastiques a 25°C, 55°C e 75°C .....	53
Figura 4.4 – Curvas isotérmicas do ângulo de fase nos betumes e mastiques a 25°C, 55°C e 75°C .....	54
Figura 4.5 – Isócronas do módulo complexo dos betumes e mastiques a 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz .....	56
Figura 4.6 – Isócronas do ângulo de fase dos betumes e mastiques a 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz ...	57
Figura 4.7 – Diagramas de Black dos mastiques betuminosos .....	58
Figura 4.8 – Variação dos fatores de translação das curvas mestras dos mastiques e ligantes betuminosos, em função da temperatura .....	60
Figura 4.9 – Curvas mestras do módulo complexo em função dos betumes 35/50 e PMB 45/80-65 .....	61

Figura 4.10 – Curvas mestras do ângulo de fase em função dos betumes 35/50 e PMB 45/80-65.....	62
Figura 4.11 – Ajustamento entre os resultados experimentais e obtidos pelo modelo de Einstein do módulo complexo relativo.....	65
Figura 4.12 – Ajustamento entre os resultados experimentais e obtidos pelo modelo de Krieger-Dougherty do módulo complexo relativo .....	66
Figura 4.13 – Ajustamento entre os resultados experimentais e obtidos pelo modelo de Nielsen do módulo complexo relativo.....	67
Figura 4.14 – Ajustamento entre os resultados experimentais e obtidos pelo modelo de Faheem do módulo complexo relativo.....	68
Figura 4.15 – Módulo de corte complexo relativo em função do volume efetivo de fíler ( $V_{fe}$ )....	69
Figura 4.16 – Leis de fadiga com base na abordagem tradicional dos mastiques betuminosos estudados dos ensaios de fadiga descontínuos .....	73
Figura 4.17 – Relação PV e $N_{f,50}$ com todos os materiais estudados dos resultados obtidos dos ensaios de fadiga contínuo .....	76
Figura 4.18 - Relação PV e $N_{f,50}$ com todos os materiais estudados dos resultados obtidos dos ensaios de fadiga descontínuo e comparação com os resultados dos ensaios de fadiga contínuo.....	76
Figura 4.19 – Relação entre $\log(PV)$ e períodos de repouso dos mastiques betuminosos.....	77
Figura 4.20 – Evolução da curva de energia dissipada em função do tempo de fadiga, $N_{f,50}$ , quanto à influência do tipo de ligante.....	78
Figura 4.21 - Evolução da curva de energia dissipada em função do tempo de fadiga, $N_{f,50}$ , quanto à influência do tipo de fíler .....	79
Figura 4.22 – Evolução da curva de energia dissipada em função do tempo de fadiga, $N_{f,50}$ , quanto à influência do conteúdo de fíler .....	81
Figura 4.23 – Evolução ao longo de um ensaio de fadiga com incremento sucessivo de deformação.....	82
Figura 4.24 – Evolução do parâmetro $C(t)$ em função da deformação aplicada no ensaio de fadiga com incremento sucessivo de deformação .....	83
Figura 4.25 – Representação de $C(t)$ versus $D(t)$ dos mastiques betuminosos .....	84



## Índice de quadros

Quadro 1.1 – Identificação dos mastiques betuminosos estudados.....	4
Quadro 2.1 - Valores dos parâmetros do modelo 2S2P1D usados nas referências bibliográficas .....	23
Quadro 3.1 - Principais propriedades convencionais dos ligantes betuminosos estudados .....	35
Quadro 3.2 - Massa volúmica dos betumes utilizados.....	35
Quadro 3.3 - Propriedades dos fíleres .....	37
Quadro 3.4 – Resultados obtidos por peneiração por jato de ar .....	37
Quadro 3.5 – Identificação dos mastiques betuminosos usados no estudo experimental .....	38
Quadro 3.6 - Formulações da relação fíler-betume usados nas referências bibliográficas .....	39
Quadro 3.7 – Volume efetivo de fíler e volume de betume fixo e livre nos mastiques .....	40
Quadro 4.1 - Divisão em categorias para análise dos resultados experimentais .....	52
Quadro 4.2 – Valores das constantes, dos parâmetros reológicos e do módulo complexo relativo do modelo de Faheem.....	67
Quadro 4.3 – Valores das constantes do modelo 2S2P1D usados na modelação das curvas mestras.....	69
Quadro 4.4 – Valores de módulo complexo e rácio de rigidez dos mastiques e ligantes para 25°C, 55°C e 75°C, a 10Hz .....	70
Quadro 4.5 – Resultados de vida de fadiga e do módulo complexo dos mastiques a deformação contínua, segundo a abordagem tradicional .....	72
Quadro 4.6 – Valores de vida de fadiga, $N_{f,50}$ , dos ensaios de fadiga descontínuos, com base na abordagem tradicional dos mastiques betuminosos estudados .....	73
Quadro 4.7 – Valores de $N_{f,50}$ e PV para os diferentes períodos de repouso usados nos ensaios de fadiga descontínuos .....	77
Quadro 4.8 – Resultados dos parâmetros $m$ e $\alpha$ a partir do varrimento de frequência.....	81
Quadro 4.9 – Valores dos coeficientes, $C_0$ , $C_1$ e $C_2$ e do parâmetro de dano, $D_f$ .....	84
Quadro 4.10 – Valores das constantes A e B da lei de fadiga com base na abordagem do dano contínuo viscoelástico .....	85
Quadro A.1 – Relação fíler-betume em massa e quantidades em massa e em volume de fíler e de betume dos mastiques estudados .....	97
Quadro B.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique B/NHL5_20% .....	99
Quadro B.2 – Valores médios do ângulo de fase ( $^\circ$ ) do mastique B/NHL5_20% .....	99
Quadro C.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique B/RC480_20% .....	101
Quadro C.2 – Valores médios do ângulo de fase ( $^\circ$ ) do mastique B/RC480_20%.....	101
Quadro D.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique P/NHL5_20% .....	103
Quadro D.2 – Valores médios do ângulo de fase ( $^\circ$ ) do mastique P/NHL5_20%.....	103
Quadro E.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique P/RC480_20% .....	105
Quadro E.2 – Valores médios do ângulo de fase ( $^\circ$ ) do mastique P/RC480_20%.....	105

Quadro F.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique B/NHL5_33% .....	107
Quadro F.2 – Valores médios do ângulo de fase ( $^{\circ}$ ) do mastique B/NHL5_33% .....	107
Quadro G.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique B/RC480_33% .....	109
Quadro G.2 – Valores médios do ângulo de fase ( $^{\circ}$ ) do mastique B/RC480_33% .....	109
Quadro H.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique P/NHL5_33% .....	111
Quadro H.2 – Valores médios do ângulo de fase ( $^{\circ}$ ) do mastique P/NHL5_33% .....	111
Quadro I.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique P/RC480_33% .....	113
Quadro I.2 – Valores médios do ângulo de fase ( $^{\circ}$ ) do mastique P/RC480_33% .....	113

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

## Símbolos

### Letras romanas

Símbolos	Significado
$A$	Constante do modelo reológico de <i>Nielsen</i> , Superfície específica das partículas, Constante da relação entre energia dissipada acumulada e vida de fadiga
$a, b$	Notações indicativas do número de ciclo de carregamento com $b > a$ , Constantes da lei de fadiga
$a_1$	Taxa de rigidez inicial usado no modelo de <i>Faheem</i>
$a_2$	Taxa de rigidez final usado no modelo de <i>Faheem</i>
$a_T$	Fator de deslocamento horizontal usado na construção das curvas mestras
$b$	Betume
$B$	Constante do modelo reológico de <i>Nielsen</i>
$c, d$	Constantes e regressão da relação entre $PV$ e $N_f$
$C_0, C_1, C_2$	Constantes da equação de ajustamento à curva $C(t)$ versus $D(t)$
$C_3, C_4, C'$	Constantes do modelo reológico de <i>Hesami</i>
$C(t)$	Parâmetro definidor da integridade do material ao longo do tempo
$d$	Constante do modelo de <i>Hesami</i>
$D$	Intensidade do dano
$D_f$	Intensidade do dano acumulado correspondente a um determinado critério de falha
$D(t)$	Intensidade do dano acumulado ao longo do tempo
$f$	Fíler, Frequência
$f/b$	Relação fíler/betume
$(f/b)_m$	Relação fíler/betume em massa
$(f/b)_v$	Relação fíler/betume volumétrica
$f_r$	Frequência equivalente ou reduzida
$G$	Módulo de rigidez ou de corte
$G_1$	Constante do modelo de <i>Faheem</i>
$G_2$	Constante do modelo de <i>Faheem</i>
$G^*$	Módulo de corte complexo
$ G^* $	Norma do módulo de corte complexo
$G_0^*$	Valor inicial do módulo de corte complexo
$G_{50\%}^*$	Redução de 50% do valor inicial do módulo de corte complexo
$G_b^*$	Módulo de corte complexo do betume
$G_f^*$	Módulo de corte complexo do fíler

$G_i^*$	Módulo de corte complexo no ciclo de carga $i$
$G_m^*$	Módulo de corte complexo do mastique
$G_r^*$	Módulo de corte complexo relativo
$G'$	Módulo conservativo ou elástico
$G''$	Módulo dissipativo ou viscoso
$G_g$	Módulo vítreo ( <i>Glassy modulus</i> )
$G_0$	Módulo de corte complexo quando a frequência tende para zero
$G_\infty$	Módulo de corte complexo quando a frequência tende para infinito
$G_b$	Massa volúmica do betume
$G_f$	Massa volúmica do fíler
$h$	Constante do modelo 2S2P1D, Distância entre duas partículas de fíler efetivas do modelo de <i>Hesami</i> , Espessura entre dois pratos paralelos ( <i>gap</i> )
$h_r$	Distância relativa entre partículas no modelo de <i>Hesami</i>
$i$	Notação indicativa do número de ciclo de carregamento
$I_D$	Módulo complexo inicial dividido pelo módulo de 1 MPa
$k$	Constante do modelo 2S2P1D, Constante associada à abordagem do dano contínuo viscoelástico
$K_E$	Coefficiente de <i>Einstein</i> generalizado
$L$	Medida em litro
$M$	Binário ou Torque
$M_b$	Massa de betume
$M_f$	Massa de fíler
$n$	Notação indicativa do número de ciclo de carregamento
$N_c$	Número de partículas usado no modelo de <i>Hesami</i>
$N_c^p$	Número de partículas na estrutura primária usado no modelo de <i>Hesami</i>
$N_f$	Vida à fadiga (número de ciclos de carregamento até se atingir um determinado critério de falha num ensaio de fadiga)
$N_{f,50}$	Número de ciclos de carregamento até se atingir 50% de redução no valor inicial de rigidez (ou do módulo de corte complexo)
$r$	Raio da partícula de fíler usado no modelo de <i>Hesami</i> , Raio do prato paralelo superior
$t$	Tempo
$T$	Temperatura
$T_{ref}$	Temperatura de referência
$V_b$	Volume de betume ou volume da fase líquida da suspensão
$V_{bf}$	Volume de betume fixo
$V_{bl}$	Volume de betume livre
$V_f$	Volume de fíler ou volume da fase sólida da suspensão

$V_{fe}$	Volume de fíler efetivo
$V_{fr}$	Volume de vazios de ar no fíler seco compactado
$W$	Energia potencial

### **Letras gregas**

#### **Símbolos      Significado**

$\alpha$	Constante do modelo 2S2P1D, Constante relacionada com a taxa de evolução do dano segundo a abordagem do dano contínuo viscoelástico
$\beta$	Constante do modelo 2S2P1D
$\gamma$	Deformação de corte
$\gamma^*$	Deformação de corte representada em notação complexa
$\gamma_0$	Deformação de corte inicial
$\gamma_{lim}$	Deformação de corte limite da região viscoelástica linear
$\delta$	Ângulo de fase, Espessura da camada de betume adsorvido pela partícula de fíler do modelo de <i>Hesami</i>
$\varepsilon$	Espessura da camada de betume parcialmente influenciada do modelo de <i>Hesami</i>
$\varepsilon_R$	Índice de vazios de <i>Rigden</i> ou índice de vazios de fíler seco compactado
$\eta$	Viscosidade da suspensão
$\eta'$	Viscosidade intrínseca do fíler
$\eta_0$	Viscosidade do fluido contínuo
$\eta_r$	Viscosidade relativa
$\theta$	Ângulo deflexão
$\lambda$	Tempo característico, sendo constante do modelo 2S2P1D
$\tau^*$	Tensão de corte representada em notação complexa
$\tau_0$	Tensão de corte máxima aplicada
$\xi$	Soma da espessura da camada de betume adsorvida com a espessura da camada de betume parcialmente influenciada
$\varphi$	Concentração de fíler em volume
$\varphi_c$	Concentração crítica de fíler
$\varphi_e$	Concentração de fíler efetivo
$\varphi_m$	Fração volumétrica de compacidade máxima do fíler
$\psi$	Constante do modelo reológico de <i>Nielsen</i>
$w$	Frequência angular

## Siglas e Abreviaturas

Siglas	Significado
2S2P1D	Modelo reológico de <i>Huet-Sayegh</i> modificado ( <i>2 Springs, 2 Parabolic creep elements and 1 Dasphot</i> )
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AC	Conteúdo asfáltico do betume
CaO	Valor de óxido de cálcio de fíler
CENIMAT	Centro de Investigação de Materiais da Faculdade de Ciências e Tecnologia
DE	Energia Dissipada ( <i>Dissipated Energy</i> )
DE <sub>n</sub>	Energia Dissipada Acumulada
DSR	Reómetro de Corte Dinâmico ( <i>Dynamic Shear Rheometer</i> )
DTT	Ensaio de Tensão Direta ( <i>Direct Tension Test</i> )
EN	Norma Europeia
EP	Estradas de Portugal
FCT-UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
JAE	Junta Autónoma de Estradas
LAS	Ensaio de fadiga com incremento sucessivo de deformação ( <i>Linear Amplitude Sweep</i> )
LVE	Viscoelástico Linear ( <i>Linear Viscoelastic</i> )
MBV	Valor de Azul Metileno ( <i>Methylene Blue Value</i> )
NHL5	Fíler de cal hidráulica
NP	Norma Portuguesa
PMB	Betume modificado com polímeros ( <i>Polymer Modified Bitumen</i> )
PP8	Geometria de pratos paralelos, com prato superior de 8 mm
PP25	Geometria de pratos paralelos, com prato superior de 25 mm
PV	Valor de patamar ( <i>Plateau Value</i> )
RC480	Fíler de calcário
RDEC	Taxa de variação de energia dissipada ( <i>Ratio of Dissipated Energy Change</i> )
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno ( <i>Styrene Butadiene Styrene</i> )
SHRP	Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária ( <i>Strategic Highway Research Program</i> )
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TTSP	Princípio da sobreposição tempo-temperatura ( <i>Time-Temperature Principle</i> )
VECD	Abordagem de Dano Contínuo Viscoelástico ( <i>Viscoelastic Continuum Damage</i> )
WLF	Equação estabelecida por <i>William-Landel-Ferry</i>

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

O estudo do comportamento reológico e mecânico dos materiais que compõem os pavimentos flexíveis tem como objetivo prolongar a vida útil dos mesmos e assegurar uma melhor comodidade e segurança em serviço.

Em Portugal, o tipo de pavimento mais comumente utilizado é o pavimento flexível, composto por camadas inferiores granulares e camadas superiores betuminosas. Estas últimas camadas são constituídas por misturas betuminosas, as quais tratam da aglomeração de agregados grossos ao ligante betuminoso, juntamente com agregados mais finos e fíler. O mastique corresponde à mistura do betume com a fração de agregado fino, no qual se inclui o fíler. O fíler corresponde a material de partículas de origem mineral, em que pelo menos 65% do material passa no peneiro #200 (0,075 mm) (Bardini et al., 2012).

O mastique betuminoso desempenha um papel de ligante na mistura betuminosa, uma vez que envolve e mantém os agregados grossos ligados, preenche os vazios existentes no esqueleto mineral da mistura betuminosa e garante compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade às misturas betuminosas (Micaelo et al., 2012).

Vários autores, (Anderson, 1996; Taylor, 2007; Faheem, 2009; Matos, 2012), indicam que o mastique betuminoso é um material com comportamento viscoelástico, que apresenta interação entre os dois compostos, formando duas fases importantes no mastique denominadas por betume livre e por betume fixo, estando definidos na Figura 1.1.

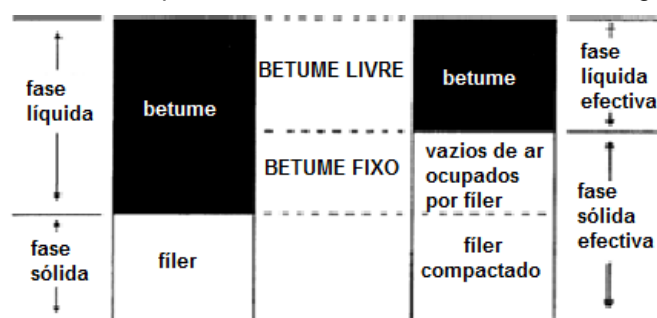


Figura 1.1 – Esquema da representação do betume fixo e do betume livre num mastique betuminoso adaptado em (Faheem, 2009)

O betume fixo preenche os vazios entre as partículas de fíler à sua compacidade máxima,  $\varphi_m$ . O betume livre trata-se do betume em excesso e permite lubrificar o mastique, contribuindo para as propriedades reológicas do mastique (Anderson, 1996; Gubler et al., 1998). Neste conceito, a quantidade de betume fixo ou adsorvido é influenciada pelas características geométricas do fíler, o que afeta o comportamento reológico do mastique. O mastique betuminoso constituído por um fíler mais irregular apresenta um aumento da viscosidade, e portanto uma maior quantidade de betume fixo do que um mastique com fíler mais regular.

Rigden (1947) verificou que a percentagem de betume livre se trata de um fator importante para definir a consistência do mastique, e que as alterações na viscosidade do mastique são

devidas à fração de vazios existentes, designada por índice de vazios de Rigden. Segundo Rigden, os fíleres acomodam o volume de betume fixo na estrutura de vazios das partículas.

A fração de compacidade e o índice de vazios de fíler seco compactado são fatores importantes que afetam as propriedades reológicas do mástico betuminoso.

Soenen and Teugels (1999), Liao (2007), Liao et al. (2012) e Liao et al. (2013) recorreram ao reómetro de corte dinâmico para analisar o efeito da adição de fíler no comportamento reológico e mecânico do betume. Este aparelho efetua a análise dinâmica para determinar as propriedades reológicas, módulo de corte complexo e ângulo de fase, do material viscoelástico, numa gama de condições de temperaturas e de frequências verificadas em serviço. Soenen and Teugels (1999) examinaram a interação entre fíler-betume e verificaram pouco efeito na interação química entre fíler e betume no comportamento viscoelástico linear do mástico. O efeito de rigidez relativa era apenas dependente da concentração em volume de fíler e independente do tipo de fíler e betume. Concluíram que a adição de fíler aumenta a rigidez e a resposta elástica do composto, devido à presença de esqueleto mineral. Verificaram o efeito do esqueleto mineral do fíler nas medições reológicas, quando se aumentava a temperatura ou se diminuía a frequência, em que o módulo de rigidez do betume é inferior ao módulo de rigidez do mástico. À medida que a percentagem de fíler em volume aumentava, a compacidade de fíler influenciava o módulo complexo. Referiram que os mastiques concentrados alcançavam um valor constante para baixas frequências devido ao esqueleto mineral e por não haver interação entre fíler e betume.

Os mastiques betuminosos são considerados suspensões, onde as partículas de fíler estão suspensas no betume. Numa suspensão diluída existe pouco conteúdo em fíler e portanto a distância entre partículas é maior do que o tamanho médio das partículas, havendo ausência de interação hidrodinâmica entre partículas. Em suspensões concentradas, o conteúdo em fíler aumenta e a distância entre partículas diminui, provocando interação hidrodinâmica (Tadros, 1996). Vários investigadores têm recorrido a modelos reológicos para estimar a viscosidade e o módulo complexo da suspensão fíler-betume e avaliar o efeito da adição do fíler nas suspensões, sem necessariamente recorrer à elaboração de ensaios experimentais. Estes modelos analisam a variação do comportamento reológico do mástico, devido à agregação das partículas, grau de dispersão e tamanho das partículas (Kim and Little, 2004; Faheem, 2009; Faheem and Bahia, 2010; Hesami et al, 2012). Yussof (2012) caraterizou o comportamento reológico do mastiques através de modelos matemáticos e mecânicos.

É fundamental o conhecimento do comportamento do mástico, no que concerne ao comportamento da mistura betuminosa, devido à ligação entre o mástico e os agregados grossos. Esta ligação é caraterizada pela sua resistência mecânica, função da coesão interna do mástico e da interação na interface entre o mástico e os agregados e pode ser afetada pelo envelhecimento do betume, provocando alterações na composição química e reológica do betume (Silva, 2005).

Bardini et al. (2011) referiram que os principais danos estruturais observados nos pavimentos flexíveis são as rodeiras, devidas às deformações permanentes, e o fendilhamento por fadiga.



O fendilhamento por fadiga manifesta-se quando o material do pavimento está mais envelhecido, após ter sido submetido à aplicação de cargas cíclicas de tráfego, ou quando o material aplicado não é o mais adequado.

Soenen et al (2004) referiram que o ligante betuminoso desempenha um papel fundamental no mecanismo de falha, pois a maioria das fendas ocorre no interior do betume, sendo que algumas ocorrem na interface de ligação entre betume e agregados. No entanto, numa mistura betuminosa, o betume é misturado com fíler, formando o mastique betuminoso. Assim, Liao (2007) admitiu que as propriedades reológicas e mecânicas do mastique são mais relevantes para se correlacionarem com o desempenho da mistura.

Airey et al. (2006), Liao (2007) e Liao et al. (2012) realizaram ensaios de fadiga no reómetro de corte dinâmico e analisaram o efeito da adição de fíler no desempenho de fadiga do betume. Observaram que a adição de fíler no ligante, além de aumentar a sua rigidez, tem uma grande importância na vida de fadiga do mastique, na medida em que contribuem para um pior desempenho à fadiga.

Outros estudos têm avaliado a capacidade de auto-regeneração do mastique, através da interrupção dos ciclos de carga repetidos, quer por meio de períodos de repouso de curta duração, constituindo o denominado carregamento intermitente em Daniel and Kim (2001), Osman (2004) e Van den bergh (2011), quer por meio de longos períodos de repouso, através de um carregamento descontínuo em Van den bergh (2011).

## 1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo estudar a influência do fíler no comportamento reológico do ligante betuminoso e resistência à fadiga. Este estudo sucede ao estudo elaborado por Pereira (2014), no qual foram caracterizados os ligantes betuminosos.

Para a execução dos ensaios requeridos para este trabalho foram utilizados os seguintes materiais constituintes para o fabrico dos mastiques betuminosos:

- betume de penetração nominal “35/50”;
- betume modificado com polímero SBS “PMB 45/80-65”;
- fíler de cal hidráulica, NHL5;
- fíler de calcário, RC480.

No fabrico dos mastiques betuminosos utilizaram-se duas relações volumétricas de fíler-betume distintas, de modo a analisar a influência da concentração de fíler no comportamento do mastique betuminoso. Pelo que no presente trabalho foram ensaiados 8 mastiques betuminosos, estando identificados ao longo do presente estudo, segundo consta no Quadro 1.1:

Quadro 1.1 – Identificação dos mastiques betuminosos estudados

Designação	Ligante betuminoso	Fíler	Relação fíler-betume em volume
B/NHL5_20%	35/50	NHL5	0,25
B/RC480_20%	35/50	RC480	0,25
P/NHL5_20%	PMB 45/80-65	NHL5	0,25
P/RC480_20%	PMB 45/80-65	RC480	0,25
B/NHL5_33%	35/50	NHL5	0,50
B/RC480_33%	35/50	RC480	0,50
P/NHL5_33%	PMB 45/80-65	NHL5	0,50
P/RC480_33%	PMB 45/80-65	RC480	0,50

Para a concretização dos objetivos estabelecidos foram realizadas as seguintes tarefas:

- formulação dos mastiques betuminosos com as composições indicadas no Quadro 1.1;
- caraterização reológica dos mastiques estudados;
- modelação do comportamento reológico dos mastiques através do modelo mecânico 2S2P1D de Yussuf (2012) e dos modelos baseado na reologia de Nielsen (1975), Faheem (2009) e Hesami et al. (2012);
- avaliação da resistência à fadiga e capacidade de auto-regeneração dos mastiques.

### 1.3. Organização do estudo

O presente estudo está organizado em 5 capítulos.

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento do tema, os objetivos e a organização do mesmo.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão breve da literatura sobre o mástico betuminoso, abordando, nomeadamente, o conhecimento e definição do próprio material em estudo, a sua composição, a interação entre os constituintes da suspensão, os modelos reológicos da suspensão e a resistência ao fendilhamento por fadiga.

O terceiro capítulo trata da parte experimental do estudo, donde se apresentam os materiais utilizados e as condições utilizadas nos ensaios com reómetro rotacional.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de caraterização reológica e de avaliação da resistência ao fendilhamento e da capacidade de auto-regeneração do mástico, realizando uma análise crítica e comparativa em relação ao trabalho executado com os ligantes betuminosos de base (Pereira, 2014).

Finalmente, o último capítulo inclui as conclusões relativas ao estudo desenvolvido e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros, relacionados com o tema em causa.

Posteriormente estão citadas as referências bibliográficas utilizadas no âmbito da presente dissertação, onde se inclui também as normas europeias utilizadas na execução dos ensaios laboratoriais, anexos e apêndices.

## **2. Revisão da literatura**

### **2.1. Considerações gerais**

Numa mistura betuminosa existe um composto formado por betume e partículas minerais de fíler, que constitui o masticue betuminoso, sendo este considerado o real ligante da mistura (Liao, 2007). O masticue betuminoso é um composto que permite preencher os vazios existentes no esqueleto mineral da mistura, o que garante a compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade das misturas betuminosas (Bardini et al., 2011).

A composição do masticue pode conduzir a uma deficiente ligação entre agregado-masticue, provocando a desagregação das misturas e a diminuição das suas propriedades, nomeadamente a resistência ao fendilhamento por fadiga e propriedades reológicas, proporcionando, assim, a ocorrência de patologias verificadas no pavimento rodoviário, como o fendilhamento por fadiga (Scholtz, 1995).

Com o intuito de melhorar o comportamento da mistura betuminosa são analisados e avaliados os materiais constituintes, principalmente o masticue, sob condições semelhantes às prestadas em serviço, através da aplicação de carregamento repetido, permitindo determinar as suas propriedades mecânicas fundamentais, como a fadiga, deformação permanente e módulo de rigidez (Silva et al., 2005). Os ensaios oscilatórios de corte realizados no reómetro de corte dinâmico são os mais utilizados na literatura para caraterizar o comportamento reológico e mecânico dos materiais viscoelásticos. Neste tipo de ensaios é possível simular-se as condições prestadas em serviço do pavimento, quando realizado dentro da gama de resposta viscoelástica linear. A resposta do material às cargas é viscoelástica em condições típicas de serviço, o qual é função da temperatura e da frequência das cargas (Airey et al., 2003).

No presente estudo foi realizada a caraterização reológica e mecânica do masticue betuminoso, através de ensaios de corte em regime oscilatório utilizando o reómetro rotacional, com o intuito de avaliar a influência do fíler no comportamento do masticue.

### **2.2. Constituição do masticue betuminoso**

Geralmente, o masticue betuminoso é constituído pela mistura do ligante betuminoso com as frações finas do agregado mineral (Silva, 2005; Micaelo et al., 2012). É considerado o verdadeiro ligante da mistura betuminosa, o qual possui comportamento viscoelástico por ser constituído por partículas sólidas de comportamento elástico, fíleres, e por ligante betuminoso de comportamento viscoelástico em condições de serviço (Silva, 2005; Silva et al., 2005a; Bardini et al, 2012; Matos, 2012; Bardini, 2013).

De acordo com Osman (2004), há dois mecanismos de atração entre os dois componentes do masticue betuminoso, a absorção e adsorção. O fíler apresenta uma superfície larga e assim uma grande capacidade de adsorção, tendo uma capacidade de absorção pequena, devido ao

reduzido volume. Para ocorrer absorção é necessário haver volume para o material absorvido ocupar depois de passar através da superfície (Matos, 2012).

Anderson and Goetz (1973), Chen and Peng (1998), Gubler et al. (1998), Lesueur and Little (1999) e Soenen and Teugels (1999) verificaram que a rigidez dos mastiques depende do tipo, tamanho e concentração de fíler. Para baixas concentrações de fíler, este material fica suspenso no betume e a contribuição do fíler na rigidez do betume é devida ao preenchimento em volume e à interação entre betume e fíler. Para elevadas concentrações de fíler, a rigidez é também afetada pela interação entre partículas.

As propriedades do mastique influenciam o comportamento reológico da mistura, e são determinadas pelo tipo e teor dos seus componentes, pelas propriedades reológicas do betume e pela forma e estrutura das partículas do fíler (Bardini et al., 2011).

Para a definição completa do mastique betuminoso é relevante definir-se e caraterizar-se os seus componentes. Antunes (2013) e Bardini (2013) consideraram que a qualidade do mastique é verificada através das caraterísticas de fíler e do ligante betuminoso, bem como da interação físico-química entre os dois componentes.

### **2.2.1. Ligante betuminoso**

O betume é o principal aglutinante utilizado no fabrico das misturas betuminosas para a pavimentação rodoviária. Este ligante é obtido por destilação direta do petróleo bruto, tratando-se duma mistura complexa de moléculas de hidrocarbonetos de massas moleculares distintas. Os asfaltenos são materiais complexos aromáticos de peso molecular elevado e muito polares, que conferem rigidez ao betume. Read and Whiteoak (2004) admitiram que o conteúdo em asfalto tem grande efeito nas caraterísticas reológicas do betume, pois à medida que o seu conteúdo aumenta, a viscosidade aumenta.

O betume é um material viscoelástico e a sua consistência varia grandemente com a temperatura. Este assume um comportamento do tipo sólido elástico para elevadas frequências ou baixas temperaturas e comporta-se como um líquido viscoso quando sujeito a grandes períodos de carga ou elevadas temperaturas (Osman, 2004; Read and Whiteoak, 2004).

Devido ao aumento de utilização dos pavimentos rodoviários têm-se aplicado betumes com caraterísticas melhoradas, através da sua modificação com a adição de aditivos, a fim de melhorar a flexibilidade, a trabalhabilidade, a coesão ou ductilidade do betume (Santos, 2010).

Os aditivos mais utilizados nos ligantes betuminosos são os polímeros, mais concretamente os elastómeros e os plastómeros, uma vez que são os que contribuem para uma melhoria na resistência à deformação permanente, e à fissuração térmica e de fadiga, bem como ao envelhecimento do material (Read and Whiteoak, 2004). Segundo Read and Whiteoak (2004) e Liao (2007), a adição de modificadores altera o comportamento reológico do betume, na medida em que aumenta a rigidez do betume puro, através da redução da resposta viscoelástica das misturas betuminosas ou aumenta a componente elástica do betume para reduzir a componente viscosa.

### 2.2.2. Fíler mineral

As misturas betuminosas possuem na sua composição partículas finas de minerais provenientes dos agregados grossos, designadas por fíler. Esta fração de mineral é definida como o material que passa na maioria ou no todo no peneiro #200 (0,075 mm), a qual permite melhorar o comportamento reológico, mecânico e suscetibilidade térmica e à água das misturas (Chen e Peng, 1998; Osman, 2004; Chen et al., 2007; Bardini et al., 2011 e 2012; Bardini, 2013).

O fíler é um material selecionado que pode ser natural, artificial, de origem inorgânica e mineral, distinguindo-se em dois tipos: recuperado e comercial. O fíler recuperado é obtido das frações mais finas de agregados, provenientes de britagem, podendo ser separados das frações mais grossas dos agregados através de extratores de poeiras. O fíler comercial, como o pó de calcário e cal hidráulica, é obtido artificialmente e deve cumprir as exigências granulométricas estipuladas pelos Cadernos de Encargos.

O fíler desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades e do comportamento da mistura. O fíler toma um comportamento do tipo *material inerte* por preencher os vazios entre os agregados mais grossos da mistura, conferindo-lhe uma maior resistência. Por outro lado, serve como um *material ativo* devido às suas características superficiais e finura, onde a sua atividade é evidente nas propriedades da interface entre o fíler e o betume, em que se misturam com o betume formando o masticue aumentando a sua consistência e aglutinando as partículas maiores (Osman, 2004). Estas propriedades na interface entre os dois constituintes do masticue têm uma grande influência na melhoria das propriedades do betume e nas propriedades principais da mistura, como o comportamento mecânico, conteúdo de betume ótimo, durabilidade, trabalhabilidade (Osman, 2004; Silva, 2005; Liao, 2007; Bardini et al., 2011; Antunes, 2013). Assim, Chen et al. (2007) admitiram que um melhor entendimento dos efeitos do fíler nas propriedades da mistura e do masticue contribui para um melhor desempenho e projeto da mistura.

Lesueur and Little (1999) concluíram que a cal hidratada se tratava de um fíler ativo, por admitir uma elevada concentração química reativa. O nível de interação entre as partículas de fíler ativo e o betume afeta bastante a reologia para elevadas temperaturas quando comparado com fileres inertes.

Bardini et al. (2012) e Bardini (2013) observaram que a adição de fíler altera o comportamento reológico do betume, pois contribui para o aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento da resistência a esforços de corte, aumento do módulo de rigidez e da resistência a tração e flexão, tornando o ligante mais elástico e rígido. O teor de fíler tem mais influência que o tipo, apesar de ambos influenciarem bastante a resposta do ângulo de fase do masticue (Bar dini et al., 2012).

Liao et al. (2012) verificaram o efeito de rigidez do fíler, quando o valor da rigidez inicial do masticue era sempre superior ao do betume base. Concluíram que a grande diferença entre os valores de rigidez inicial entre mastiques à mesma concentração de fíler é devida aos diferentes valores de volumes efetivos de fíler.

Antunes (2013) analisou a influência do fíler no comportamento do mastique através das suas propriedades físico-químicas e mecânicas. Verificou que a adição de fíler na matriz betuminosa contribui para o aumento da rigidez do conjunto. Contudo, a excessiva quantidade de fíler adicionada ao mastique betuminoso pode gerar um comportamento inadequado e quebradiço do sistema fíler-betume. Deste modo, estudos têm estimado a quantidade de fíler a adicionar ao betume, através da introdução do conceito de betume livre. Chen and Peng (1998) testaram mastiques a 5 conteúdos de betume livre diferentes, 30%, 40%, 50%, 60% e 80% em volume. Verificaram que para uma percentagem de betume livre de 30%, não se verificava contacto entre as partículas minerais, donde as partículas estavam suspensas no meio betuminoso, constituindo o valor mínimo de projeto para fíleres usados na mistura.

As caraterísticas físicas, como a densidade, distribuição de tamanhos das partículas, forma da partícula, textura e fração de compacidade máxima, e químicas do fíler influenciam o comportamento da mistura betuminosa, através da ligação agregado-mastique (Silva, 2005).

Segundo Liao (2007), o desempenho da mistura e a sua trabalhabilidade dependem bastante da concentração e do tipo de fíler. Assim, Anderson and Goetz (1973) e Bardini (2013) analisaram os efeitos do fíler mineral quanto ao tipo e teor de fíler no comportamento mecânico das misturas betuminosas. Anderson and Goetz concluíram que os vários tipos de fíler provocam diferentes efeitos no reforço do mastique dependendo da natureza do fíler e do tipo de betume, devido à presença de alguma interação físico-química, não sendo justificados pela graduação em fíler.

Liao (2007) admitiu que as propriedades físicas e mecânicas dos mastiques betuminosos são influenciadas pelas caraterísticas geométricas e físicas do fíler, nomeadamente distribuição de tamanho de partículas, forma da partícula, vazios de Rigden, área superficial específica e massa volúmica. Chen and Peng (1998) observaram que as partículas de menores dimensões tomam maiores áreas superficiais que as partículas maiores para a mesma concentração em fíler, exibindo, assim, uma maior resistência à tração. Por outro lado, Antunes (2013) verificou que uma partícula com superfície rugosa e forma angulosa admite maior facilidade em fixar o betume. Quanto maior a superfície específica, maior a capacidade em adsorver o ligante.

A forma, a densidade das partículas e o procedimento de ensaio usado para medir o conteúdo em vazios afetam diretamente a compacidade máxima do fíler ou o conteúdo em vazios (Anderson, 1996). Rigden (1947) definiu o índice de vazios de fíler compactado com base no conteúdo de betume ótimo, em que as partículas de fíler mineral assumem compacidade máxima, sendo específica de cada tipo de fíler. O efeito de compacidade de fíler influencia o comportamento reológico do mastique, estando relacionado com o volume de concentração do fíler, sendo que quanto maior o teor de fíler, menor a distância entre partículas e portanto maior a compacidade (Liao et al., 2012).

A adsorção e absorção dos grupos químicos do betume são dois fenómenos que ocorrem na interação entre fíler e betume, que dependem da composição do betume e das propriedades físico-químicas e estrutura interna do fíler (Silva, 2005; Antunes, 2013). A porção adsorvida do ligante betuminoso pelo fíler são os asfaltenos, resultando num material mais fluído entre as

partículas, denominado por betume fixo, e o ligante sobranete, sendo menos suscetível à adsorção por ser mais fluido e admitir uma natureza oleosa, designa-se por betume livre (Bardini, 2013).

Faheem (2009), Faheem and Bahia (2010) e Faheem et al. (2012) caracterizaram o efeito do fíler no betume, tendo proposto um modelo para a rigidez relativa masticue-betume. Outros investigadores têm recorrido a modelos reológicos para prever o efeito de rigidez das suspensões diluídas e concentradas, através da interação fíler-betume e das características físicas do fíler (Lesueur and Little, 1999; Kim and Little, 2004; Liao, 2007; Taylor, 2007; Genovese, 2012; Hesami et al., 2012).

Ao longo deste capítulo irá analisar-se com mais detalhe o efeito de adição do fíler no ligante betuminoso com base no efeito do teor de fíler e com base na interação entre fíler e betume.

### 2.3. Interação fíler-betume

O sistema fíler-betume é considerado uma suspensão, onde as partículas minerais de fíler, sólidas e elásticas, estão suspensas num fluido com propriedades viscoelásticas, denominado por betume. A inclusão destas partículas provoca uma reação hidrodinâmica no sistema fíler-betume, afetando as propriedades reológicas do masticue betuminoso.

Faheem (2009) e Faheem and Bahia (2010) investigaram a interação entre os dois componentes do sistema de suspensão recorrendo a um modelo concetual. Este modelo permitiu interpretar e prever o efeito de rigidez do fíler no masticue, com base nas características físicas do fíler e do ligante.

Outros investigadores (Kim and Little, 2004; Liao, 2007; Taylor, 2007; Genovese, 2012; Hesami et al., 2012) utilizaram outras abordagens baseadas na reologia, empregando modelos compósitos micromecânicos para quantificar o potencial de rigidez do masticue. Estes modelos permitem prever a rigidez do masticue betuminoso para uma dada quantidade de volume de fíler abaixo da sua compacidade máxima, definido pelo método desenvolvido por Rigden, citado em Taylor (2007).

O efeito do fíler é baseado no efeito do teor em fíler e no efeito de interação entre fíler e betume devido às características superficiais e ao tamanho do fíler. Este último efeito está relacionado com aspetos físico-químicos que explicam a interação interfacial específica dos sistemas fíler-betume e a influência nas características mecânicas do betume (Kim and Little, 2004; Bardini et al., 2011).

Quando a deformação é aplicada a uma amostra de masticue betuminoso, esta deformação ocorre dentro da fase do ligante, pois constitui a fase mais frágil. Uma vez que o fíler tem influência no aumento da rigidez do betume, a resistência à deformação do masticue é controlada pela fração de volume de betume que não é influenciada pelas partículas finas, ou seja, pela fração de betume livre. À medida que a fração de fíler em volume aumenta, a fração de betume influenciada pelo fíler aumenta, resultando numa maior resistência à deformação do masticue (Faheem e Bahia, 2010).

Soenen and Teugels (1999) realizaram ensaios no reômetro de corte dinâmico, utilizando mastiques betuminosos, com o intuito de avaliarem a interação entre o fíler e o betume. Os mastiques foram fabricados com 4 betumes de classes de penetração distintas de origens diferentes e misturados com 3 fíleres minerais (quartzo, riolite e riolite tufo), os quais apresentavam propriedades físicas, densidade e superfície específica, semelhantes, sendo a concentração de fíler em massa de 30%, 45% e 55%. Os ensaios de varrimento de frequência a tensão controlada foram realizados a cada 5°C, cobrindo uma gama de módulo de mastique entre 100 Pa e  $10^8$  Pa dentro da região viscoelástica linear. A partir dos resultados obtidos do módulo complexo relativo ( $G^*_{\text{mastique}}/G^*_{\text{betume}}$ ) verificou-se pouco efeito da interação química entre fíler e betume no comportamento viscoelástico linear do mastique. Estas relações de rigidez do mastique não eram iguais às testadas com a mesma concentração de fíler, devido ao efeito de compactidade do fíler. Para elevadas concentrações de fíler, a 55% de volume em fíler, o esqueleto de fíler começava gradualmente a evidenciar-se nas medições reológicas à medida que a temperatura aumentava ou a frequência diminuía, tal como observado na Figura 2.1. Os autores concluíram que o efeito da rigidez relativa era apenas dependente da concentração de fíler em volume, sendo independente do tipo de fíler e da origem do betume.

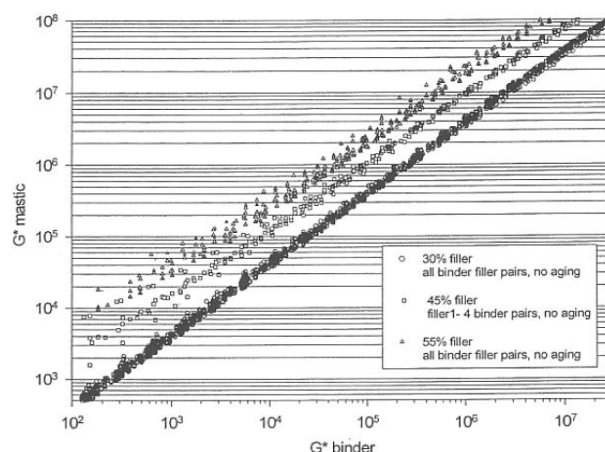


Figura 2.1 – Influência da concentração de fíler no módulo complexo nos mastiques betuminosos (Soenen e Teugels, 1999)

### 2.3.1. Compactidade do fíler

O índice de vazios de Rigden e a compactidade de fíler são dois importantes fatores que influenciam o comportamento reológico e mecânico do mastique betuminoso (Chen and Peng, 1998; Soenen and Teugels, 1998; Faheem et al., 2012; Liao et al., 2012).

A compactidade do fíler (traduzido em inglês por *filler packing*) trata da combinação de várias propriedades físicas do composto, como da distribuição de tamanho de partículas minerais, da superfície específica, massa volúmica e índice de vazios de Rigden (Chen and Peng, 1998; Soenen and Teugels, 1998; Liao et al., 2012).

Por vezes, os termos concentração em fíler e compactidade de fíler são confundidos. A concentração em fíler diz respeito à quantidade de fíler em volume que as partículas minerais ocupam no sistema fíler-betume, enquanto compactidade de fíler diz respeito ao espaçamento



entre partículas. Lesueur and Little (1999), Soenen and Teugels (1999) e Liao (2007) verificaram que cada tipo de fíler admite uma compacidade de fíler diferente para a mesma concentração em fíler, uma vez que depende das características físicas do fíler. Para a mesma concentração de fíler em volume, a distância entre partículas é menor para uma compacidade maior do que para compacidade menor. Nas regiões onde se verifica maior compacidade, ou seja, maior concentração de tensão, é mais suscetível de ocorrer falha (Chen and Peng, 1998). Liao et al. (2012) acrescentaram que a compacidade de fíler se trata do grau de dispersão de fíler no sistema fíler-betume, estando relacionado com o volume de concentração do fíler. A compacidade das partículas mais grossas produz um volume mais grosseiro do sistema fíler-betume. À medida que as partículas finas são adicionadas ao sistema, estas vão ocupando os espaços entre as partículas maiores. O resultado da progressão geométrica depende dos vazios restantes no sistema e da grande gama de tamanhos de partículas, alcançando um maior grau de compacidade (Ferrigno, 1987).

Nos documentos referidos, os investigadores utilizaram os termos compacidade máxima e compacidade mínima para descreverem a mesma definição, pelo que no presente trabalho utilizou-se o conceito de compacidade máxima. Soenen and Teugels (1999) definiram a compacidade máxima de fíler quando todas as partículas estão em contato entre si, obtendo-se um volume de vazios mínimo. Este fator é obtido a partir de partículas mais finas, apresentando maior área superficial (Ferrigno, 1987).

A compacidade máxima ou o conteúdo de vazios do fíler é única para cada tipo de fíler, pois depende das características físicas do fíler, como o tamanho, formato e distribuição das partículas, a rugosidade e o procedimento de ensaio utilizado na medição do conteúdo de vazios (Anderson, 1996).

Rigden (1947) introduziu um conceito no que concerne à interação fíler-betume, através da determinação do valor de volume de vazios no fíler seco compactado, designado usualmente por índice de vazios de Rigden. Com base na determinação do índice de vazios de Rigden, o autor estimou o conteúdo de betume ótimo para qualquer fíler, que corresponde ao valor de volume de fíler de compacidade máxima.

O índice de vazios de Rigden é uma das propriedades físicas do fíler que afeta a rigidez do ligante betuminoso, influenciando o desempenho do masticue (Faheem and Bahia, 2010).

O estudo de Rigden introduziu o conceito de betume livre e a partir da sua pesquisa vários investigadores têm considerado o mesmo conceito para as suas pesquisas científicas (Anderson, 1996; Gubler et al., 1998; Liao, 2007; Taylor, 2007; Faheem, 2009; Antunes, 2013; Bardini, 2013).

Anderson (1996) referiu que para um masticue betuminoso não se utiliza a compacidade máxima de fíler, pois as partículas minerais do fíler devem estar separadas por uma certa quantidade de betume, tal como exemplificado através da Figura 2.2:

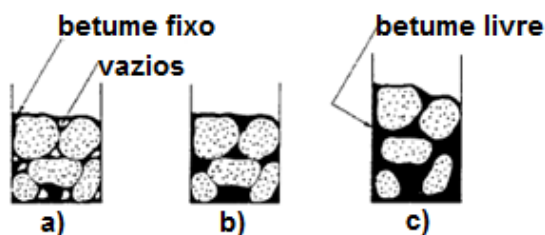


Figura 2.2 – Ilustração do betume livre e betume fixo, onde: a) mastique com insuficiente betume para preencher os vazios; b) mastique com vazios preenchidos pelo betume; c) mastique com betume livre adicionado, separando partículas de fíler individualmente; adaptado (Anderson, 1996)

Na Figura 2.2 observam-se duas fases distintas de betume no mastique betuminoso, denominadas por betume fixo e betume livre. Verifica-se que, à medida que se adiciona betume ao fíler, este vai primeiramente preencher os vazios entre o fíler, como representado na situação b), cuja designação é betume fixo, uma vez que está fixado no interior da estrutura mínima de vazios. O betume em excesso observado na situação c) é denominado por betume livre.

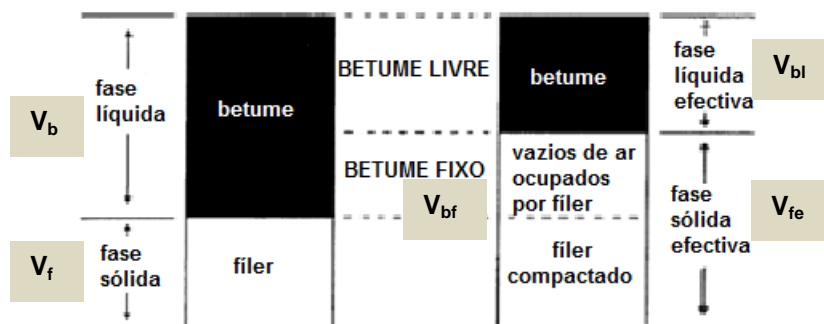


Figura 2.3 – Esquema da representação do betume fixo e do betume livre num mastique betuminoso adaptado em (Faheem, 2009)

O betume fixo preenche os vazios entre as partículas de fíler à sua máxima configuração de compactidade,  $\varphi_m$  (Gubler et al., 1998). Segundo Rigden, os fíleres acomodam o volume de betume fixo na estrutura de vazios das partículas e está relacionado com a rigidez do mastique, observado pela Figura 2.3. Por outras palavras, o betume fixo trata da quantidade de ligante betuminoso influenciada pelas partículas finas minerais. Assim, tem-se que quando todo o betume incluído no mastique é influenciado pelo fíler, o mastique perde a capacidade de aglutinar e lubrificar os agregados grossos da mistura betuminosa.

A quantidade de ligante restante no mastique é denominada por betume livre e permite lubrificar o mastique, contribuindo para as propriedades reológicas do mastique (Anderson, 1996; Gubler et al., 1998). Uma maior quantidade de betume livre, traduz-se numa menor rigidez da mistura. Existe sempre uma quantidade de volume de betume em excesso, devido à compactidade imperfeita (Osman, 2004).

Rigden (1947) considerou que a percentagem de betume livre trata de um fator importante para definir a consistência do mastique e verificou que as alterações na viscosidade são independentes das caraterísticas do betume ou de outras caraterísticas do fíler, sendo apenas dependentes da fração de vazios. De acordo com Chen and Peng (1998) deve-se utilizar uma

percentagem de volume de betume livre superior a 30%, por forma a permitir que o fíler escoe no betume, evitando o contato entre as partículas. Enquanto Anderson (1996) sugeriu que se deveria utilizar uma percentagem de conteúdo de betume livre igual ou inferior a 40% para o estudo das propriedades mecânicas das misturas betuminosas.

Por observação da Figura 2.3 pode constatar-se que quanto maior for o índice de vazios do fíler, maior é a quantidade de betume adsorvido, influenciado pelo fíler, e menor é quantidade de betume livre. Uma amostra de fíler com um índice de vazios de Rigden mais elevado conduz a um mastique mais viscoso (Antunes, 2013).

A proporção de betume fixo é determinada a partir da diferença  $V_{fe} - V_f$ , onde  $V_{fe}$  é o volume de fíler efetivo e  $V_f$  é o volume da fração sólida.

O ensaio de Rigden pode estimar a quantidade de betume livre,  $V_{bl}$ , utilizada no sistema fíler-betume e o volume de vazios de ar no fíler seco compactado,  $V_{fr}$ , sendo esta determinada pela equação  $V_{bl} = V_b - (V_{fe} - V_f)$  (Liao, 2007).

Liao et al. (2013) admitiram que, no sistema fíler-betume, a percentagem de volume de fíler sólida, a qual corresponde à percentagem de betume fixo, toma igual valor ao da percentagem de volume de massa efetiva de fíler na base dos vazios de Rigden dos fíleres. Assim, o volume efetivo de fíler,  $V_{fe}$ , é superior à percentagem composicional de fíler que se apresenta no mastique,  $V_f$ , determinados pelas equações (2.2) e (2.1), respetivamente:

$$V_f = \frac{M_f / G_f}{M_f / G_f + M_b / G_b} \quad (2.1)$$

em que  $M_f$  e  $M_b$  são a massa de fíler e de betume (kg), respetivamente, e  $G_f$  e  $G_b$  são a massa volúmica de fíler e de betume ( $\text{kg/m}^3$ ), respetivamente.

A concentração de fíler em volume efetivo,  $V_{fe}$ , é estimada com base no índice de vazios de Rigden:

$$V_{fe} = \left( \frac{100}{1 - \varepsilon_R} \right) * V_f \quad (2.2)$$

onde  $\varepsilon_r$  é o valor de índice de vazios de Rigden. Quanto maior é o valor do índice de vazios de Rigden que o fíler apresenta, mais rígido é o sistema fíler-betume, pois o composto apresenta um maior volume de fíler efetivo, ou seja, uma menor percentagem em betume livre.

### 2.3.2. Modelos reológicos das suspensões fíler-betume

Os mastiques betuminosos podem ser considerados suspensões, onde a fase sólida, partículas de fíler, está dispersa na fase fluida, betume, Figura 2.4. As partículas sólidas estão dispersas, devido à ação de forças repulsivas ou dispersivas das forças entre si. Tem-se que as partículas tendem a aglomerar-se, quando há mais forças atrativas (Genovese, 2012).

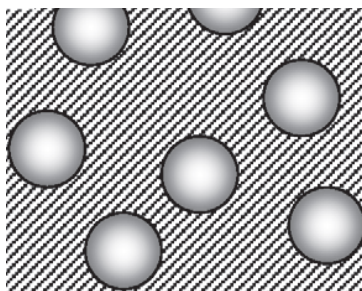


Figura 2.4 – Representação esquemática duma suspensão de compósito fíler-matriz (Genovese, 2012)

A presença de partículas sólidas afeta o comportamento reológico do mástico, pois aumenta a viscosidade da suspensão e a sua contínua adição à suspensão conduz a uma suspensão mais viscosa.

Note-se que o estudo da reologia do material betuminoso é fundamental para a compreensão do comportamento verificado num pavimento rodoviário flexível. Deste modo, investigadores utilizaram o reómetro para efetuar o estudo das propriedades viscoelásticas lineares do mástico betuminoso (Kim and Little, 2004; Faheem, 2009). Contudo, a caraterização destes materiais não foi esclarecida, devido à sua natureza complexa e à interação entre fíler e o betume. Assim, Nielsen and Lee (1971), Nielsen (1975), Kim and Little (2004), Genovese (2012) e Hesami et al. (2012) desenvolveram modelos micromecânicos baseados na reologia das suspensões sobre o efeito de rigidez do fíler nos mastiques.

Os modelos desenvolvidos por estes investigadores permitem estimar a viscosidade das suspensões com base na concentração em fíler e na viscosidade do ligante betuminoso. O controlo das propriedades das suspensões é feito pela distribuição do tamanho e forma das partículas, interação entre partículas e betume e fração de volume da fase dispersa, partículas minerais de fíler (Tadros, 1996).

Para uma melhor interpretação dos modelos micromecânicos válidos para a descrição do comportamento do mástico, é fundamental o conhecimento do conceito de suspensão e da interação entre as duas fases da suspensão.

Segundo Tadros (1996), as suspensões admitem resposta viscosa, elástica ou viscoelástica, em função do rácio entre o tempo de relaxação do sistema, que depende dos parâmetros de controlo da sua reologia, e o tempo de ensaio. As suspensões diluídas mostram uma resposta predominantemente viscosa, apresentando uma grande distância entre as partículas, o que resulta numa reduzida interação hidrodinâmicas ou superficiais entre si. À medida que a concentração das partículas na suspensão aumenta, o volume de espaços ocupados pelas partículas em relação ao volume total da suspensão aumenta. No limite têm-se as suspensões rígidas que possuem uma resposta elástica sólida, onde o espaçamento entre partículas é muito reduzido, quando comparado com o raio das partículas. As suspensões concentradas estão entre as suspensões líquidas e sólidas, apresentando uma resposta viscoelástica. O volume de fração das partículas é suficientemente elevado para ocorrerem interações entre si. Tal como nas suspensões rígidas, as forças hidrodinâmicas e superficiais assumem um papel importante na determinação das propriedades deste sistema. As propriedades deste sistema dependem do tempo (Tadros, 1996).

A interação de esferas duras rígidas é um dos quatro tipos de interação entre partículas, na qual são consideradas esferas duras rígidas de raio superior ao seu raio efetivo e se observam forças atrativas e repulsivas (Tadros, 1996).

As propriedades reológicas da suspensão são determinadas pelo balanço de três tipos de forças: difusão Browniana, interação hidrodinâmica e forças superficiais (repulsivas e atrativas) (Tadros, 2011).

O primeiro modelo reológico foi proposto por Einstein em 1906. Este modelo permite prever a alteração linear da viscosidade relativa,  $\eta_r$ , com o aumento da concentração de partículas, e é válido para suspensões diluídas de esferas duras rígidas, sendo expresso pela equação (2.3). Taylor observou que à medida que a fração de volume sólida aumentava, a magnitude da área superficial e o contato entre partículas também aumentavam (Taylor, 2007).

$$\eta_r = 1 + \eta' \cdot \varphi \quad (2.3)$$

Em que  $\eta'$  é a viscosidade intrínseca do fíler, relacionado com as características físicas do fíler, como o tamanho, forma e rigidez das partículas e interação entre partículas e fluido, e  $\varphi$  é a concentração de fíler em volume, obtida pelo quociente  $V_f / (V_f + V_b)$ , onde  $V_f$  é o volume da fase sólida e  $V_b$  é o volume da fase líquida. Einstein determinou um valor teórico de 2,5 para  $\eta'$  para suspensões diluídas constituídas por partículas esféricas duras rígidas.

Na interação de esferas duras rígidas, a sua reologia é estimada entre a difusão Browniana e interação hidrodinâmica, que permite determinar a viscosidade relativa,  $\eta_r$ , com a fração de volume  $\varphi$  da dispersão (Tadros, 2011).

No entanto, o modelo de Einstein toma uma relação linear, que apenas depende da fração volúmica da fase sólida. Pelo que Lesueur and Little (1999) verificaram que a viscosidade intrínseca se tratava de um parâmetro de ajustamento numa curva, relacionado à concentração máxima de fíler,  $\varphi_m$ :

$$\eta' = \frac{2}{\varphi_m} \quad (2.4)$$

Vários estudos adaptaram o modelo de Einstein, a fim de definirem modelos que pudessem estimar a viscosidade para suspensões mais concentradas, introduzindo o conceito de fração de compacidade máxima,  $\varphi_m$ . Lesueur and Little (1999) utilizaram um valor de 63% para esta fração, a qual representa o volume da fase sólida onde a viscosidade da suspensão tende para infinito. Para elevadas concentrações, as partículas produzem interações hidrodinâmicas, onde a expressão (2.3) deixa de ser válida.

Krieger and Dougherty (1959) elaboraram a melhor análise da curva entre a viscosidade relativa e a fração de volume das partículas. A sua expressão semi-empírica (2.5) é válida para suspensões concentradas do tipo floculado, onde a aglomeração das partículas provoca interações hidrodinâmicas entre si:

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-\eta' \cdot \varphi_m} \quad (2.5)$$

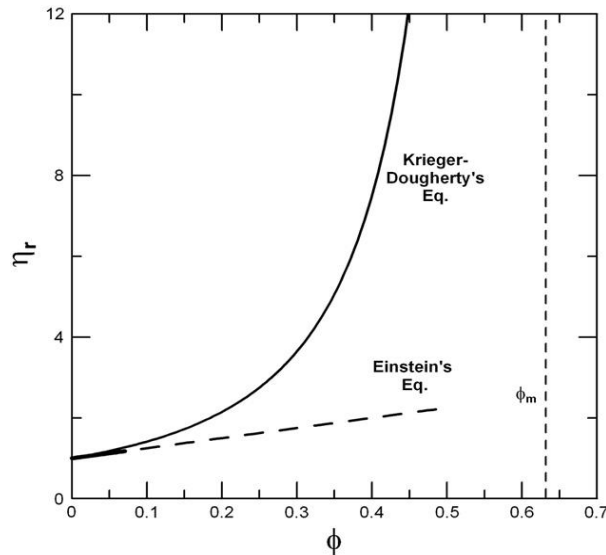


Figura 2.5 – Viscosidade relativa em função da fração de volume prevista pela equação de Einstein para suspensões diluídas de esfera dura rígida e pela equação de Krieger e Dougherty para suspensão concentrada de esfera dura rígida (Genovese, 2012)

Na Figura 2.5 estão definidos os resultados obtidos pelas expressões (2.3) de Einstein relativa a suspensão diluída de esferas duras rígidas e (2.5) de Krieger and Dougherty (1959) válida para suspensões concentradas de esferas duras rígidas. Verifica-se que, para a mesma fração de volume de fíler, a viscosidade relativa obtida pela expressão de Einstein é inferior à da outra expressão. À medida que a concentração de partículas se aproxima da compacidade máxima do fíler, a viscosidade tende para um valor infinito, pois não existe fluido suficiente para lubrificar os elementos sólidos da suspensão (Pal, 2002; Taylor, 2007; Genovese, 2012).

Taylor (2007) recorreu à expressão de Krieger-Dougherty para modelar a reologia dos mastiques, o qual permitiu prever valores realísticos da viscosidade intrínseca para suspensões concentradas, como o mástico betuminoso.

Kim and Little (2004), Chen et al. (2007) e Huang et al. (2007) modificaram o modelo de Maron-Pierce, obtendo um modelo simplificado de Krieger-Dougherty, de modo a quantificar o efeito de fíler no módulo de corte complexo, equação (2.6):

$$G_m^* = G_b^* \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-2} \quad (2.6)$$

onde  $G_b^*$  é o módulo de corte complexo do betume (MPa) e  $G_m^*$  é o módulo de corte complexo do mástico (MPa), para a mesma temperatura e período de carga. Como a expressão de Maron-Pierce é apenas dependente de  $\varphi_m$ , não se considera a interação físico-química entre betume e fíler.

O modelo de Kerner modificado por Nielsen (1970) utiliza dois parâmetros reológicos, o coeficiente de Einstein generalizado,  $K_E$ , e a fração de compacidade máxima de fíler,  $\varphi_m$ , de modo a se obter um melhor ajuste aos dados do mástico para diferentes conteúdos de fíler em volume, pois consideram a contribuição físico-química na rigidez e o efeito de preenchimento de fíler na suspensão, respetivamente. O conhecimento destes parâmetros para diferentes suspensões conduz à seleção de fíleres adequados para melhorar as propriedades do mástico (Kim and Little, 2004). A equação generalizada de Kerner do módulo

de corte relativo para os materiais compósitos proposta por Nielsen (1970), permitiu estimar teoricamente o valor da densidade máxima do fíler, em função do módulo de corte do mastique. Esta equação (2.7) foi utilizada nas pesquisas de Nielsen (1970), Nielsen and Lee (1971), Ferrigno (1987), Liao (2007) e Hesami et al. (2012) e relaciona o aumento do módulo complexo com a adição de fíler:

$$G_r^* = \frac{G_m^*}{G_b^*} = \frac{1 + A \cdot B \cdot V_f}{1 - B \cdot \psi \cdot V_f} \quad (2.7)$$

onde  $A$ ,  $B$  e  $\psi$  são constantes determinadas nas equações (2.8), (2.9) e (2.10), respetivamente:

$$A = K_E - 1 \quad (2.8)$$

$$B = \frac{G_f^*/G_b^* - 1}{G_f^*/G_b^* + A} \quad (2.9)$$

$$\psi = 1 + \frac{1 - \varphi_m}{\varphi_m^2} \cdot V_f \quad (2.10)$$

onde  $G_f^*$  é o módulo de corte das partículas sólidas minerais.

A constante  $A$  está relacionada com o coeficiente de Einstein e é determinada pela morfologia do sistema, incluindo o formato das partículas. Einstein definiu um valor de  $K_E$  de 2,5 para suspensão de esferas duras rígidas. O valor de  $B$  é igual a 1, quando a relação  $G_f^*/G_b^*$  é muito elevada, o que significa que as partículas de fíler são muito mais rígidas que o ligante betuminoso, como ocorre nos mastiques betuminosos. Quando  $V_f = \varphi_m$  significa o contacto total entre partículas, ocupando todos os espaços vazios.

Na Figura 2.6 verifica-se o efeito da alteração de  $\varphi_m$  para um valor de coeficiente de Einstein constante, ilustração à esquerda, e a variação da curva de rigidez com  $K_E$  a  $\varphi_m$  constante, ilustração à direita.

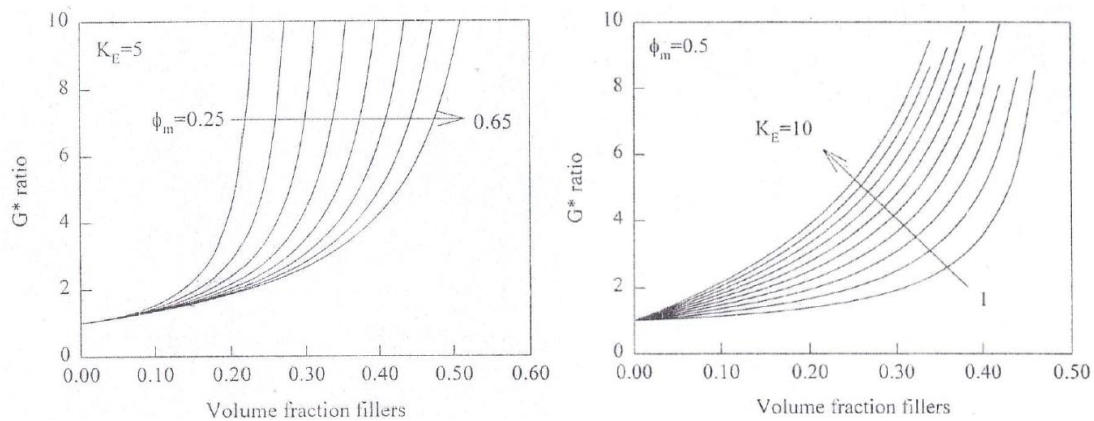


Figura 2.6 – Efeito da alteração de  $\varphi_m$  e de  $K_E$  (Shashidhar et al., 1999)

Pal (2002) traçou um gráfico com os dados experimentais de  $G_r^*$  em função dos valores experimentais de fração de fíler em volume e obteve um valor de  $\varphi_m$  de 0,5. Entretanto substituiu na expressão (2.7) esse valor e, com os dados experimentais, traçou a curva de previsão de módulo complexo relativo em função da fração de fíler, para diferentes valores de quocientes entre os dois módulos complexos de 10, 100 e  $\infty$ , apresentado na Figura 2.7. Pal

observou que, para uma dada fração de fíler em volume, o módulo complexo relativo do compósito aumenta com o aumento dos valores de módulo complexo de fíler.

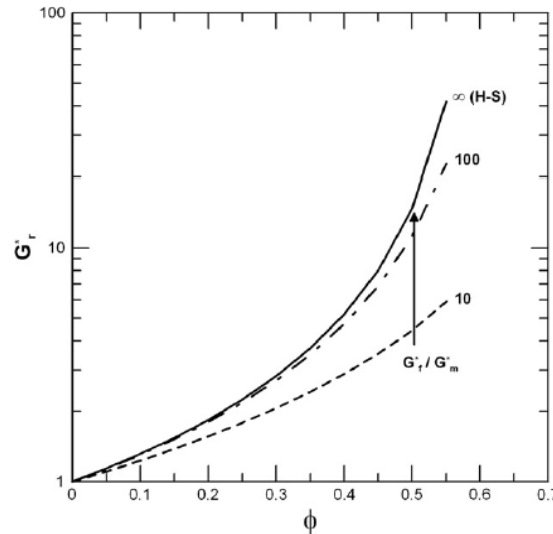


Figura 2.7 - Curva entre o módulo complexo relativo e a fração de partículas em volume dos compósitos gel, segundo expressão modificada de Kerner, com  $\varphi_m = 0,6$ , sob diferentes valores de módulo complexo relativo das partículas de fíler (Genovese, 2012)

Lesueur and Little (1999) estudaram o efeito da cal hidratada na fratura e reologia do betume através do modelo Maron-Pierce e do modelo Nielsen, tendo demonstrado que a fração de compacidade máxima influencia a taxa de crescimento de rigidez.

Chen et al. (2007) apresentaram resultados dos parâmetros obtidos das expressões (2.6) e (2.7) a partir de regressão não linear e verificaram que a abordagem de Maron-Pierce e modelo de Nielsen podem ser usados para prever o efeito de rigidez do fíler nos mastiques.

Hesami et al (2012) desenvolveram um novo modelo capaz de determinar a viscosidade do mastique para qualquer concentração de fíler, baseado em três expressões, que dependem da viscosidade do betume e das caraterísticas superficiais do fíler. Hesami et al. efetuaram a correta interpretação do sistema fíler-betume, onde consideraram uma análise em duas fases. A primeira fase relaciona-se com o betume que engloba a partícula mineral,  $\varepsilon$ , apresentando propriedades diferentes do betume livre, admitindo um raio de influência. A outra fase trata do betume não afetado por esse raio de influência, denominado por betume livre, admitindo as propriedades originais.

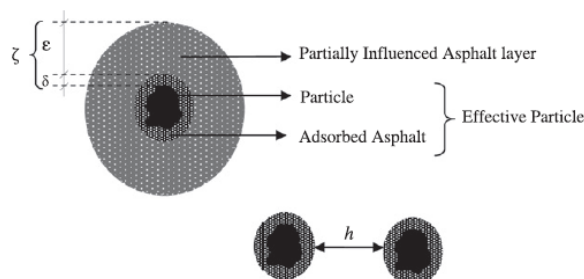


Figura 2.8 – Camadas de fluido circundantes à partícula de fíler adaptado em Hesami et al. (2012)



Outra componente é o betume adsorvido pela partícula de fíler,  $\delta$ , que atua como se fosse a partícula. As partículas efetivas são definidas pelas partículas incluindo a camada de betume adsorvida,  $\delta$ :

$$\delta = \frac{\varphi_e - \varphi}{\varphi \cdot G_f \cdot A} \quad (2.11)$$

onde  $\varphi_e$  é a concentração de fíler efetivo,  $G_f$  é a massa volúmica do fíler e  $A$  é a superfície específica das partículas.

A distância entre as duas partículas de fíler efetivas,  $h$ , considera a espessura de betume adsorvido,  $\delta$ , e o raio da própria partícula,  $r$ . Esta distância constitui um valor importante, pois influência a resistência devido ao fluxo entre as partículas, e é estimada a partir da equação (2.12):

$$h = 2 \cdot r \cdot \left[ \left( \frac{\varphi}{\varphi_m} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (2.12)$$

O valor de  $h$  é nulo, quando se observa o contato entre duas partículas. Para suspensões muito líquidas, o seu valor tende para infinito.

Hesami et al. (2012) propuseram um modelo que combinasse os modelos de Einstein e de Frankel para condições em regime hidrodinâmico nas equações (2.13) e (2.14), e em regime friccional na equação (2.15):

$$\eta_r = 1 + d \cdot \varphi, \text{ para } h \gg r \quad (2.13)$$

$$\eta_r = C' \cdot \left[ \frac{(\varphi/\varphi_m)^{1/3}}{1 - (\varphi/\varphi_m)^{1/3}} \right], \text{ para } 2 \cdot \delta < h \leq 2 \cdot \xi \quad (2.14)$$

$$\eta_r = \left( \frac{\delta}{r} - h_r \right) \cdot N_c \cdot C_3 + C_4 \cdot N_c^p, \text{ para } h \leq 2 \cdot \delta \quad (2.15)$$

onde  $\xi$  é a espessura das duas camadas à volta das partículas,  $N_c$  é o número de partículas,  $N_c^p$  trata do número de partículas na estrutura primária, que corresponde à fração de fíler com maior influência na fricção,  $h_r$  é a distância relativa entre partículas estimada pelo rácio  $h/r$  e  $d, C_3, C_4$  e  $C'$  são as constantes relacionadas com as características dos fileres e com a interação entre fíler e betume. O mastique com concentração inferior à máxima comporta-se em regime hidrodinâmico, descrito pelas expressões (2.13) e (2.14) para baixo e elevado teor em partículas, respetivamente. No regime hidrodinâmico verifica-se a dependência da concentração das partículas, enquanto no regime friccional verifica-se contato efetivo entre as partículas, onde a concentração de fíler é igual ou próxima à concentração máxima, situação correspondente à definida pela equação (2.15).

No entanto, estes modelos não são recomendados para a utilização de grandes concentrações de fíler em volume, assim é mais recomendado a utilização do modelo concetual de Faheem.

Faheem (2009) desenvolveu este modelo para caracterizar o efeito do fíler mineral no betume através do efeito de rigidez no mastique betuminoso, com base na influência da interação entre as propriedades dos dois componentes. A partir dos resultados obtidos deste modelo, recorrendo ao reómetro de corte dinâmico, Faheem traçou uma curva que representasse os

parâmetros do seu modelo, onde relaciona a concentração do fíler em volume com o módulo complexo do mástico, tal como apresentado na Figura 2.9:

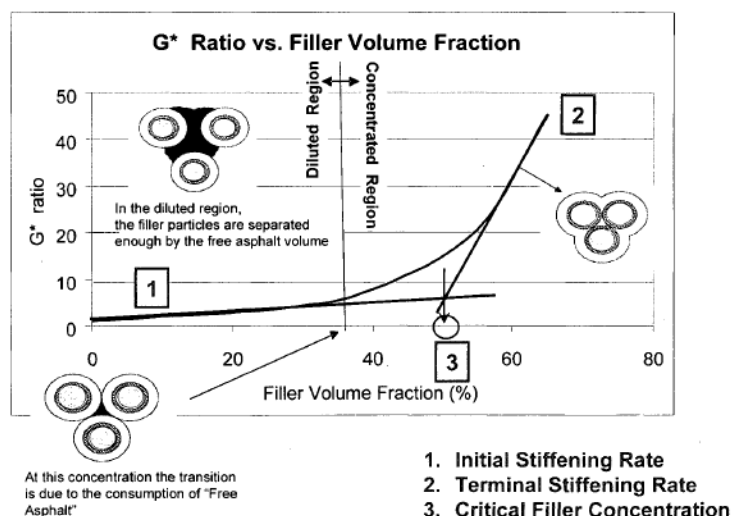


Figura 2.9 – Representação da evolução de rigidez do mástico em termos de influência do fíler (Faheem, 2009)

Faheem (2009) e Faheem et al. (2010) observaram que o aumento da fração volumétrica do fíler conduzia a um acréscimo da rigidez do composto. No entanto, esta evolução nem sempre é linear, estando a curva de rigidez dividida em duas regiões, a região diluída e a região concentrada.

A região diluída, apresentada ao início da curva de rigidez, é definida pela taxa de rigidez inicial. Nesta região, as partículas de fíler mineral estão dispersas entre si por meio de betume livre. O aumento da rigidez é justificado pela inclusão de mais partículas rígidas que vão substituindo a matriz viscoelástica menos rígida, afetando o escoamento do mástico (Faheem, 2009).

A partir do momento em que a evolução da curva de rigidez toma uma tendência não linear, inicia-se uma nova região, designada por região concentrada. Nesta região, a taxa de rigidez começa a evoluir rapidamente até apresentar um ritmo constante junto à extremidade da curva, que trata da taxa de rigidez final. A taxa de rigidez final assume um indicador de interação fíler-betume e depende bastante da fração de volume influenciado de betume. À medida que a concentração de fíler aumenta, a quantidade de betume livre vai diminuindo, sendo ocupado por betume fixo. Quando o mástico é constituído por betume fixo, a tendência de taxa de rigidez toma um ritmo semelhante ao da região diluída, apresentando um valor superior.

A concentração de fíler crítica é um parâmetro importante do modelo, pois é utilizado para caraterizar a transição da evolução da rigidez entre as duas regiões. A esta concentração de fíler corresponde ao volume de betume fixo. Este parâmetro foi estimado a partir do ensaio de aderência, o qual permite identificar as regiões diluída e concentrada.

Por forma a validar o modelo concetual, Faheem desenvolveu um modelo reológico, que permite estimar o módulo de rigidez relativo, dependente dos três parâmetros do modelo e da concentração de fíler em volume,  $\varphi$ .

Numa primeira fase, o modelo reológico foi desenvolvido com o objetivo de determinar a rigidez do mastic em função das propriedades do fíler e do betume, apresentado na equação (2.16):

$$G_r^* = G_1 + a_1 \cdot (\varphi - \varphi_c) + G_2 \cdot (a_2 - a_1) \cdot \ln \left\{ 1 + e^{\left[ \frac{(\varphi - \varphi_c)}{G_2} \right]} \right\} \quad (2.16)$$

onde  $G_r^*$  é o módulo complexo relativo,  $G_1$  e  $G_2$  são as constantes do modelo,  $a_1$  é a taxa de rigidez inicial,  $a_2$  é a taxa de rigidez final,  $\varphi$  é fração de fíler em volume e  $\varphi_c$  é a concentração crítica de fíler.

Nesta fase, Faheem ajustou apenas três parâmetros aos resultados de módulo complexo relativo obtidos de dez mastiques estudados (5 fíleres diferentes a 2 concentração de fíler em volume, usando 1 ligante betuminoso de base), recorrendo à análise de regressão multi-linear, com base nas propriedades do fíler:

$$\varphi_c = 86,2 \cdot \varepsilon_R + 4,10 \cdot MBV \quad (2.17)$$

$$a_1 = 0,162 - 0,219 \cdot \varepsilon_R \quad (2.18)$$

$$a_2 = 5,24 - 9,70 \cdot \varepsilon_R + 0,392 \cdot MBV - 0,0436 \cdot CaO \quad (2.19)$$

onde  $\varepsilon_R$  é o valor de vazios de Rigden (%),  $MBV$  é o valor de azul metileno e  $CaO$  é o valor de óxido de cálcio do fíler.

Posteriormente, o autor verificou que este modelo era restrito para os materiais usados no seu estudo. Assim necessitou de validar o modelo, de modo a prever o comportamento doutros materiais que não tivessem sido utilizados no seu estudo. Portanto, Faheem utilizou outras combinações de mastiques betuminosos, utilizando apenas quatro fíleres, dois ligantes base modificados e uma concentração em fíler. A partir dos resultados obtidos com estes mastiques, o investigador estimou as expressões de cálculo (2.20) e (2.21) para os restantes parâmetros:

$$G_1 = 0,22 \cdot (AC/G_b^*) + 2,15 \quad (2.20)$$

$$G_2 = -2,57 \cdot G_b^* + 9,06 \quad (2.21)$$

onde  $AC$  trata do conteúdo asfalteno do betume e  $G_b^*$  é o módulo complexo do betume.

Este modelo fornece uma ferramenta importante para estimar o papel das propriedades físicas e químicas do betume e do fíler na rigidez do mastic.

A maioria dos estudos reológicos dos materiais viscoelásticos recorre à utilização de aparelhos laboratoriais, nomeadamente ao reómetro de corte dinâmico. Contudo, a estes aparelhos estão associadas algumas limitações que podem gerar resultados pouco fiáveis, principalmente quando são realizados para reduzidas temperaturas ou elevadas frequências, além de exigirem um grande consumo de tempo e conhecimento do equipamento. Para contornar esta situação, Yussof (2012) apresentou inúmeros modelos reológicos mecânicos e matemáticos, em alternativa aos ensaios laboratoriais, tendo apresentado o modelo generalizado de Huet-Sayegh, designado por 2S2P1D (2 *Springs*, 2 *Parabolic elements* and 1 *Dashpot*) válido para modelar as propriedades reológicas dos mastiques e ligantes betuminosos.

O modelo 2S2P1D foi utilizado nos estudos de Olard and Di Benedetto (2003), Di Benedetto et al. (2004), Delaporte et al. (2009) e Pereira (2014) e consiste na combinação de 2 molas ( $G_\infty - G_0, G_0$ ), que representam o comportamento elástico, 2 elementos parabólicos ( $k, h$ ) e 1 amortizador ( $\eta$ ), que representa o comportamento viscoso, na Figura 2.10 em Di Benedetto et al. (2004).

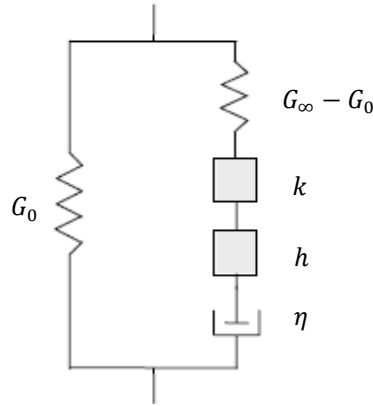


Figura 2.10 – Representação do modelo generalizado “2S2P1D” (Di Benedetto et al., 2004)

Para além das 5 constantes representadas na Figura 2.10, este modelo admite mais outras duas constantes,  $\beta$  e  $\lambda$ . A partir destas constantes, o valor do módulo complexo do mastique betuminoso é estimado para uma dada temperatura em função da frequência reduzida:

$$G^*(i.w.\lambda) = G_0 + \frac{G_\infty - G_0}{1 + \alpha.(i.w.\lambda)^{-k} + (i.w.\lambda)^{-h} + (i.w.\beta.\lambda)^{-1}} \quad (2.22)$$

onde  $\alpha$  é uma constante,  $w$  é a frequência angular determinada em  $w = 2.\pi.f_r$  (rad/s),  $h$  e  $k$  são expoentes onde  $0 < k < h < 1$ ,  $G_0$  é o módulo complexo estático para  $w \rightarrow 0$ ,  $G_\infty$  é o módulo complexo vítreo, que também pode ser representado por  $G_g$  para  $w \rightarrow \infty$ ,  $\lambda$  trata-se de um valor constante designado por tempo característico e  $\beta$  é uma constante obtida em função da viscosidade Newtoniana, em:

$$\beta = \frac{\eta}{(G_\infty - G_0).\lambda} \quad (2.23)$$

Posto isto, para o presente modelo é preciso estimar os valores das 7 constantes para modelar as propriedades reológicas do mastique. No entanto, investigadores citados no Quadro 2.1, ajustaram os valores obtidos pelo presente modelo aos resultados obtidos nas curvas mestras e verificaram que algumas constantes não necessitam de ser ajustadas aos resultados obtidos, tornando mais simples a sua modelação.

Quadro 2.1 - Valores dos parâmetros do modelo 2S2P1D usados nas referências bibliográficas

Referência	Material betuminoso	$T_{ref}$ (°C)	$G_0$ (MPa)	$G_{\infty}$ (MPa)	$k$	$h$	$\alpha$	$\lambda$	$\beta$
(Olard and Di Benedetto, 2003)	Betume 50/70	10	0	2000	0,20	0,56	2,5	1,60E-04	400
	Mastique de 50/70 a 32%	10	0	9000	0,20	0,56	2,5	1,21E-04	400
	Mastique de 50/70 a 48%	10	0	20000	0,20	0,56	2,5	1,63E-4	400
(Liao, 2007; Yussof, 2012)	Mastique de 100/150 a 40% volume de calcário	25	10	2000	0,21	0,55	2,3	4,00E-4	250
	Mastique de 100/150 a 40% volume de cimento	25	120	2000	0,21	0,55	2,3	3,00E-4	250
	Mastique de pen50 a 35% massa de calcário	25	0	1200	0,21	0,59	2,3	7,00E-4	150
	Mastique de pen50 a 65% massa de calcário	25	5E-3	1500	0,21	0,59	2,3	2,00E-3	150
	Mastique de pen50 a 35% massa de cimento	25	0	1300	0,21	0,55	2,3	1,50E-4	250
	Mastique de pen50 a 65% massa de cimento	25	5E-3	1400	0,21	0,55	2,3	1,50E-3	250
(Delaporte et al., 2009)	Betume 50/70	10	0	900	0,21	0,55	2,3	1,00E-4	400
	Mastique de 50/70 a 30% volume de calcário	10	0,15	6000	0,21	0,55	2,3	6,00E-5	400
	Mastique de 50/70 a 30% volume de calcário e partículas ultrafinas	10	0,20	7000	0,21	0,55	2,3	6,00E-5	1200
(Pereira, 2014)	Betume 35/50	25	0	1000	0,20	0,61	3,5	1,80E-5	38
	Betume PMB 45/80-65	25	0	1000	0,21	0,68	5,5	6,00E-6	300

Para os ligantes betuminosos, Olard and Di Benedetto (2003) e Pereira (2014) consideraram que o módulo complexo  $G_0$  é nulo. Contudo, para os mastiques betuminosos, como possuem elementos rígidos e elásticos, o seu valor é diferente de 0 (Delaporte et al., 2009).

Através do Quadro 2.1 verificam-se valores idênticos das constantes  $h$ ,  $k$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  para os mastiques que usam o mesmo ligante base, independentemente do tipo de fíler utilizado, o que indica que as amostras tomam a mesma curvatura para baixas frequências e elevadas temperaturas. Assim, das 7 constantes que definem o modelo para o mastique, 5 tomam os mesmos valores adotados para o betume (Delaporte et al., 2009).

Di Benedetto et al. (2004) e Delaporte et al. (2009) verificaram que o módulo complexo dos diferentes mastiques era pouco afetado pelo fíler para baixas temperaturas.

Também se estimaram os parâmetros do dito modelo usando o mesmo fíler para concentrações em massa diferentes (Yussof, 2012). Yussof verificou que as amostras a 35% tomam um comportamento Newtoniano para muito baixas frequências, onde o valor do módulo vítreo  $G_g$  é zero. Anotou-se que para a concentração mais elevada a 65%, a presença de fíler começou a ser mais visível para reduzidas frequências, evidenciando-se um maior valor de  $G_g$ , provocado pela presença do esqueleto de fíler no mástico betuminoso (Delaporte et al., 2009).

Pereira (2014) verificou que o modelo 2S2P1D se ajusta bastante bem aos resultados experimentais relativos ao módulo complexo, no entanto tal não se observa para os resultados relativos ao ângulo de fase, onde se verificou um mau ajuste para ligante modificado.

## **2.4. Resistência ao fendilhamento por fadiga do mástico betuminoso**

O fendilhamento por fadiga é um dos principais defeitos verificados nos pavimentos flexíveis, provocado pela ação de cargas de tráfego repetidas, que produzem tensões e deformações à superfície do pavimento. Estas tensões repetidas provocam danos no material betuminoso, a cada passagem de carga cíclica, os quais se vão acumulando e conduzindo ao fendilhamento por fadiga no pavimento, traduzindo degradação mecânica dos materiais (Osman, 2004; Liao et al., 2012).

Soenen et al (2004) referiram que o ligante betuminoso desempenha um papel fundamental no mecanismo de falha, pois a maioria das fendas ocorre no interior do betume, sendo que algumas ocorrem na interface de ligação entre betume e agregados. No entanto, numa mistura betuminosa, o betume é misturado com o fíler, formando o mástico betuminoso. Assim, Liao (2007) admitiu que as propriedades reológicas e mecânicas do mástico são mais apropriadas para se correlacionarem com o desempenho da mistura betuminosa.

A adição das partículas minerais de fíler no ligante betuminoso, além de aumentar a rigidez da matriz, toma uma grande importância na vida de fadiga do mástico, uma vez que contribui para um pior desempenho ao fendilhamento por fadiga. Assim ocorrem interações entre os dois componentes do mástico, as quais não estão refletidas nas propriedades reológicas e mecânicas do ligante (Osman, 2004; Liao et al., 2012).

O fendilhamento por fadiga no mástico está bastante relacionado com as características do betume, propriedades do fíler e com a interação físico-química dos dois componentes, que é afetada pela finura e características de superfície do fíler (Bardini et al., 2012; Bardini, 2013).

Investigadores como Airey et al. (2006), Liao (2007) e Liao et al (2012) realizaram ensaios de varrimento de tempo para avaliar a resistência à fadiga dos mastiques betuminosos, recorrendo ao reómetro de corte dinâmico, com o objetivo de analisar o efeito produzido da adição do fíler no sistema betume-fíler. Ghaffarpour Jahromi et al. (2014) efetuaram ensaios de fadiga a deformação controlada e verificaram que à medida que se avançava com o ensaio, a elasticidade e módulo complexo diminuía e o ângulo de fase aumentava.

Para se reduzir a ocorrência de fendilhamento por fadiga no pavimento, Silva (2005) aconselha o uso de mastiques com maior teor de betume nas misturas betuminosas.

Soenen and Eckmann (2000) e Soenen et al. (2004) analisaram o efeito do tipo de betume nos ensaios de fadiga, tendo verificado que o betume modificado admite uma maior resistência à fadiga que o betume puro.

Outras investigações analisaram a capacidade de regeneração dos materiais betuminosos através da realização de ensaios de fadiga com a introdução de períodos de repouso (Kim and Daniel, 2001; Shen et al., 2010). Nestes estudos verificou-se que os materiais viscoelásticos têm a capacidade de se auto-regenerar dos danos ocorridos do fendilhamento por fadiga, o que vai contribuir para um melhor desempenho à fadiga destes materiais.

A regeneração trata da capacidade de auto-recuperação da rigidez dos materiais viscoelásticos, através da aplicação de carregamento interrompido por períodos de repouso, reduzindo a aplicação de cargas repetidas (Shen et al., 2010; Van den bergh, 2011).

Daniel and Kim (2001) e Van den bergh (2011) verificaram que a introdução de períodos de repouso contribui para o aumento da vida de fadiga dos materiais viscoelásticos entre 5 a 25 vezes, dependendo da relação entre duração de carga e período de repouso. Estes períodos de repouso são introduzidos entre cargas consecutivas aplicadas, os quais permitem facilitar tempo para as fendas se regenerarem e as deformações e tensões relaxarem, devido ao escoamento viscoso do betume (Osman, 2004).

Kim and Little (2005) verificaram que o dano de fadiga e a regeneração potencial do masticado estão relacionados com as propriedades adesivas do betume e interação entre betume e aditivos.

A compreensão do mecanismo de regeneração destes materiais vai permitir selecionar materiais que possuam maior potencial de regeneração, maior resistência ao dano e maior período de serviço (Shen et al., 2010).

#### **2.4.1. Abordagens de avaliação da resistência à fadiga**

Os ensaios de fadiga executados no reômetro de corte dinâmico têm como princípio a aplicação de cargas cíclicas às amostras betuminosas, alterando as propriedades do material, até a amostra atingir a falha. A determinação da falha, ou seja, do cálculo do número de ciclos até atingir a fadiga, é dependente do critério de falha selecionado.

Não existe um método único para a definição do limite à fadiga, mas o critério mais utilizado é a abordagem tradicional.

Estes critérios de falha tratam de abordagens de avaliação da resistência à fadiga, sendo o critério tradicional de falha utilizado por Airey et al. (2006), Liao (2007), Johnson (2010), Shen et al. (2010) e Pereira (2014), a abordagem da energia dissipada por Airey et al. (2006), Shen et al. (2010) e Pereira (2014) e a abordagem do dano contínuo viscoelástico por Johnson (2010) e Pereira (2014). Nesta última abordagem, os autores recorreram aos ensaios de amplitude linear (LAS, em inglês *Linear Amplitude Sweep*).

O desempenho ao fendilhamento por fadiga dos materiais betuminosos é estimado a partir da vida de fadiga, que trata do número de ciclos até atingir a falha estipulada segundo um dado critério de falha em função das amplitudes de carga,  $\gamma$ :

$$N_f = a \cdot \gamma_0^{-b} \quad (2.24)$$

Onde  $a$  e  $b$  são constantes obtidas a partir de ensaios cíclicos a várias amplitudes de carregamento e  $\gamma_0$  é a deformação inicial.

#### 2.4.1.1. Critério tradicional de falha

Nesta abordagem de avaliação do comportamento de fadiga dos materiais avalia-se a relação entre a tensão ou deformação inicial com a vida de fadiga (Kim and Little, 2004; Airey et al., 2006).

Liao et al. (2012) referiram que o presente critério de falha depende no modo de carga utilizado nos ensaios de varrimento de tempo. No modo de deformação controlada, a amostra do material betuminoso é submetida a uma deformação constante, onde a tensão resultante vai diminuindo por forma a manter o valor de deformação aplicado constante. Neste modo de ensaio, o ponto de falha é determinado a partir da redução de 50% do módulo de corte inicial, corresponde ao número de ciclos até atingir a falha,  $N_{f,50}$ , dado que o período de ensaio é bastante longo e a condição de fadiga pode não ser nítida. Enquanto no modo de tensão controlado, o ponto de falha é determinado quando a amostra se fratura totalmente, apresentando um período de ensaio bastante mais reduzido.

Airey et al. (2006), Liao (2007) e Liao et al. (2012) recorreram a esta abordagem para definir a falha de fadiga dos mastiques betuminosos estudados usando o reómetro de corte dinâmico (DSR, em inglês *Dynamic Shear Rheometer*).

Apesar desta abordagem ser a mais utilizada nos ensaios de avaliação de resistência ao fendilhamento por fadiga dos materiais viscoelásticos, admite algumas limitações, nomeadamente por não considerar a evolução do dano, em que o modelo só pode ser aplicado a certas condições de carga, e por ter carácter arbitrário (Kim and Little, 2005).

#### 2.4.1.2. Taxa de variação de energia dissipada

Uma vez que a abordagem fenomenológica apresenta algumas divergências, investigadores têm utilizado outro tipo de abordagem para analisar a fadiga do pavimento relacionada com a dissipação de energia (Airey et al., 2006; Shen et al., 2010; Pereira, 2014).

Ghaffarpour Jahromi et al. (2014) consideraram que qualquer deformação aplicada num material viscoelástico provoca dissipação de energia. Assim, a abordagem de energia dissipada assume que nem toda a energia dissipada representa o dano ocorrido no material, em que o fendilhamento apenas evolui quando se verifica uma diferença na dissipação de energia entre ciclos de cargas consecutivos.



A energia dissipada é devida ao comportamento viscoelástico do material e corresponde à área interior da curva tensão-deformação nas fases de carga e descarga. O método de energia dissipada depende do modo de carga e é independente do tipo de material e da temperatura (Boudabbous et al., 2013). A quantificação da energia dissipada,  $DE$ , para cada ciclo de carga,  $i$ , dum ensaio de fadiga executado em modo de deformação controlada, é dada pela expressão (2.25):

$$DE_i = \pi \cdot \gamma^2 \cdot G_i^* \cdot \sin \delta_i \quad (2.25)$$

onde  $G_i^*$  é o módulo complexo no ciclo de carga  $i$ ,  $\gamma_i$  e  $\delta_i$  são a amplitude de deformação e o ângulo de fase no ciclo de carga  $i$ , respetivamente.

A energia dissipada acumulada,  $DE_n$ , é a soma das energias dissipadas à carga respetiva:

$$DE_n = \sum_{i=1}^n DE_i \quad (2.26)$$

A quantidade de energia dissipada gerada para cada ciclo de carga adicional vai gerar uma maior extensão de fendilhamento no material, o que vai influenciar o dano acumulado. A energia dissipada acumulada representa o efeito total de dano de fadiga sem considerar o tipo de material, modo de carga e é usado para prever a falha de fadiga.

A baixa quantidade de energia dissipada relativa entre dois ciclos de cargas pode ser devida à elevada resistência à fadiga do material ou à baixa amplitude de carga exterior.

A relação entre a energia dissipada acumulada e a vida de fadiga, expressa em número de ciclos até atingir a falha,  $N_f$ , é definida segundo a expressão (2.27):

$$DE_{N_f} = A \cdot (N_f)^2 \quad (2.27)$$

Shen et al. (2010) reconheceram que RDEC (*Ratio Dissipated Energy Change*) elimina a energia que é dissipada noutras formas sem provocar quaisquer danos na amostra:

$$RDEC_i = \frac{|DE_{i+1} - DE_i|}{DE_i \cdot ((i + 1) - 1)} \quad (2.28)$$

O parâmetro RDEC trata duma melhor indicação do dano ocorrido no material entre ciclos de carga, representando um mecanismo fundamental que quantifica o dano que se acumula no material durante os ensaios de fadiga (Airey et al., 2006).

A curva de dano RDEC em função do número de ciclos de carga apresenta três fases e permite definir um importante parâmetro de fadiga. A primeira fase compreende a reorientação do material devido à aplicação da carga. A fase seguinte indica o período onde a percentagem de energia introduzida está a ser transformada em dano, e que corresponde ao valor de patamar (PV – *Plateau Value*). A última fase trata do aumento de RDEC, onde evidencia a falha por fadiga (Airey et al., 2006; Shen et al., 2010).

O valor de patamar é um parâmetro bastante utilizado como critério de falha, dado por:

$$PV = c \cdot (N_f)^d \quad (2.29)$$

onde  $c$  e  $d$  são constantes de regressão e  $N_f$  é o número de ciclos até atingir falha, determinado à redução de 50% do módulo de rigidez. O valor de  $N_f$  é atingido entre a segunda

e terceira fases da curva de dano. Este valor é representativo do parâmetro RDEC que corresponde ao número de ciclos de carga a 50% de redução do módulo inicial, no entanto também pode ser determinado a partir da curva  $DE-N_f$ . O valor de patamar toma um valor único para o número de ciclos de carga até atingir a falha e é independente do tipo de material, das condições de ensaio e do modo de ensaio.

Airey et al. (2006) observou que a curva de energia baseada no dano por fadiga dos betumes, PV vs  $N_f$ , mostrou ser paralela à curva de dano de fadiga das misturas betuminosas, o que demonstra uma forte relação entre o comportamento de fadiga dos dois materiais, sugerindo uma nova maneira de construir um modelo de dano de fadiga da mistura, com base na propriedade de dano do betume. A curvatura e a posição relativa entre as duas curvas são significantes para a compreensão do efeito das propriedades do betume, do tipo e propriedades de agregado e interação betume-agregado no comportamento de fadiga da mistura. Concluíram que a abordagem RDEC é apropriada para o estudo do comportamento de fadiga do betume e dos mastiques, pois produz um único parâmetro de energia PV semelhante ao das misturas betuminosas.

Shen et al. (2010) utilizaram a abordagem de energia dissipada para descrever o dano do betume e a regeneração do mesmo, investigando a alteração da energia durante a aplicação de cargas. A taxa de regeneração é definida pela taxa de energia dissipada recuperada por unidade de período de repouso, sendo utilizada para quantificar o potencial de regeneração dos betumes.

#### 2.4.1.3. Abordagem do dano contínuo viscoelástico

A maioria dos ensaios de fadiga que avaliam as características de resistência ao dano provocado por fadiga do betume não são práticos para serem usados nas especificações, pois são muito morosos. Assim tem-se procurado métodos de análise e ensaios que permitam avaliar esta resistência ao dano num período de tempo razoável, e que consideram os efeitos do tráfego e a estrutura do pavimento.

Na abordagem de Dano Contínuo Viscoelástico (VECD – *Viscoelastic Continuum Damage*), a resistência à fadiga do ligante betuminoso é determinada através da aceleração da evolução do dano e aplica princípios de dano contínuo. A aceleração do dano é realizada através do aumento gradual da amplitude de carga empregue num ensaio de carga cíclica, designadamente o ensaio de varrimento de amplitude linear (LAS – *Linear Amplitude Sweep*) (Johnson, 2010; Pereira, 2014).

O seu princípio permite avaliar o desenvolvimento do dano e trata de um fenómeno de auto-regeneração nas cargas a partir das características de dependência do tempo do material.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios LAS, juntamente com os resultados da caraterização reológica dos mastiques não danificados são utilizados para prever a resistência à fadiga dos betumes, sob várias condições de carga e de estrutura de pavimento.

Johnson (2010) recorreu à expressão de Schapery (2.30) para estimar a energia dissipada dos materiais viscoelásticos, que considera o dano sob carga cíclica, utilizando a lei de evolução de dano:

$$\frac{dD}{dt} = \left( -\frac{\partial W}{\partial D} \right)^\alpha \quad (2.30)$$

em que  $\alpha$  é um expoente que estima a taxa de energia libertada,  $D$  é a quantidade de dano e  $W$  é a energia potencial. O valor do expoente  $\alpha$  é estimado a partir dos dados do ensaio de varrimento em frequência.

A energia potencial pode ser estimada a partir da expressão (2.31), onde o efeito da energia dissipada é relevante no carregamento de corte cíclico a deformação controlada:

$$W = \pi \cdot I_D \cdot \gamma_0^2 \cdot |G^*| \cdot \sin \delta \quad (2.31)$$

em que  $I_D$  é o módulo complexo inicial dividido pelo módulo de 1 (MPa),  $\gamma_0$  é a deformação de amplitude aplicada,  $|G^*|$  é a norma do módulo de corte complexo (MPa) e  $\delta$  é o ângulo de fase. Substituindo a expressão (2.31) na expressão (2.30), obtém-se o valor de cálculo do dano acumulado em função do tempo:

$$D(t) = \sum_{i=1}^N [\pi \cdot I_D \cdot \gamma_0^2 \cdot (|G^*| \cdot \sin \delta_{i-1} - |G^*| \cdot \sin \delta_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2.32)$$

O valor do parâmetro  $|G^*| \cdot \sin \delta_i$  para cada medição foi ajustado para cada valor correspondente de  $D(t_i)$ :

$$|G^*| \cdot \sin \delta_i = C_0 - C_1 \cdot D^{C_2} \quad (2.33)$$

onde  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de regressão do modelo, estimados segundo a regra dos mínimos quadrados e a função Excel Solver para otimização. Johnson (2010) estipulou um critério de falha de redução de 35% no parâmetro de fadiga,  $G^* \sin \delta$ .

A abordagem do dano contínuo viscoelástico tem em conta a vida de fadiga do tipo apresentado na equação (2.24):

$$N_f = \frac{f \cdot D_f^k}{k \cdot (\pi \cdot I_D \cdot C_1 \cdot C_2)^\alpha} \cdot \gamma_{max}^{-2\alpha} \quad (2.34)$$

onde  $k$  é um parâmetro estimado a partir da equação  $1 + (1 - C_2) \cdot \alpha$ ,  $f$  é a frequência de carregamento em Hz e  $D_f$  é a acumulação de dano até se atingir a falha, constituindo o parâmetro de dano, quando a amostra se aproxima da falha de fadiga.

Observando-se a expressão de vida de fadiga em (2.34) tem-se que um material pouco rígido possui maior capacidade em absorver mais dano acumulado antes da fadiga, ou seja, apresenta elevado valor de  $D_f$ , pois  $C_1$  e  $C_2$  são reduzidos e  $k$  é elevado, o que corresponde a um maior período de fadiga (Kim e Little, 2005).

Kim and Little (2005) concluíram que quando o produto dos coeficientes de regressão é elevado, se verifica uma rápida diminuição da rigidez, ou seja, o dano é atingido mais rapidamente quando comparado com o parâmetro de dano,  $D_f$ .

A análise VECD trata de um procedimento de ensaio de curta duração, o qual permite quantificar a acumulação de dano provocado por fadiga do betume.

#### **2.4.2. Ensaio de fadiga em mastiques betuminosos usando Reómetro de Corte Dinâmico**

Os ensaios de fadiga executados no reómetro de corte dinâmico têm como princípio a aplicação de cargas cíclicas às amostras betuminosas, alterando as propriedades do material até a amostra atingir a falha. Os ensaios de fadiga mais comumente utilizados são os ensaios de varrimento de tempo e os ensaios do tipo acelerado, designados por ensaio de varrimento de amplitude linear (LAS).

Estudos têm recorrido ao parâmetro de fadiga,  $G^* \cdot \sin \delta$ , desenvolvido pelo programa Superpave, para prever o comportamento de fadiga das misturas betuminosas. Contudo, Soenen and Eckmann (2000) e Liao et al. (2012) verificaram que este critério não considerou o comportamento linear do betume, pois não havia correlação entre o parâmetro de fadiga SHRP, sendo insuficiente para prever o desempenho de fadiga de uma mistura em serviço.

Na presente revisão de literatura do comportamento de fadiga são apresentados alguns ensaios de varrimentos de tempo empregues em ligantes e mastiques betuminosos. Os ensaios de varrimento de tempo são caracterizados pelo módulo complexo ser estimado em função do período de ensaio, sujeito a carregamento oscilatório contínuo. O módulo de rigidez diminui a partir de certos ciclos de carga devido ao dano por fadiga do material betuminoso (Lu et al., 2003).

Os ensaios de fadiga executados no reómetro de corte dinâmico também foram utilizados para investigar a capacidade de auto-regeneração do módulo de corte dos betumes a baixas deformações, através da introdução de períodos de repouso no carregamento oscilatório, utilizando modo de carga intermitente e o modo de fratura da amostra betuminosa. A sequência de carga intermitente permite uma melhor simulação das condições de carga em campo e mantém a natureza de carga contínua, para que a energia dissipada possa ser determinada para cada ciclo de carga, permitindo efetuar uma análise da energia dissipada (Shen et al., 2010).

Alguns investigadores analisaram as limitações do reómetro de corte dinâmico nos ensaios executados para avaliação da resistência à fadiga. Soenen et al. (2004) verificaram que, para se obter medições corretas do comportamento de fadiga do betume, teria de se usar valores de módulo de corte complexo superiores a 60MPa, pois para valores reduzidos de rigidez observam-se interferências nos resultados de falha de fadiga e a sua diminuição com o número de ciclos é dada em função da espessura da amostra. A rigidez ensaiada deve ser elevada o suficiente para evitar interferência com os efeitos registados na periferia da geometria de pratos paralelos. No entanto, a rigidez não pode ser excessivamente elevada, pois o aparelho apresenta erros de concordância a elevados níveis de rigidez, apresentando um valor limite de

rigidez de 200MPa. No mesmo estudo, observou-se que o DSR só pode ser usado para avaliar as propriedades de fadiga numa gama baixa de temperaturas ou de rigidezes.

#### 2.4.2.1. Ensaio de fadiga a deformação controlada

Os ensaios de corte oscilatório realizados no reómetro de corte dinâmico (DSR) têm sido bastante utilizados para avaliação do comportamento de fadiga dos ligantes betuminosos e dos mastiques betuminosos, pois permitem simular a natureza de carga de tráfego utilizado em campo e avaliar as curvas de tensão-deformação e de energia dissipada.

A avaliação do comportamento de fadiga realizada em mastiques betuminosos foi efetuada com o intuito de analisar o efeito da adição de fíler nas propriedades do betume. Nas literaturas, os autores concluíram que o aumento das concentrações de fíler empregues no mástico contribui para a redução da resistência à fadiga.

Liao (2007) e Liao et al. (2012) avaliaram o efeito da influência do fíler no comportamento de fadiga do mástico, quanto ao tipo e ao conteúdo de fíler, recorrendo a ensaios de varrimento de tempo no reómetro de corte dinâmico, no modo de carga a tensão e a deformação controlada. Nestes ensaios realizados a 10°C e 20°C sob 10Hz no DSR, os investigadores utilizaram um ligante base de penetração 50 e três tipos de fíler (cimento, arenito e calcário) a 2 concentrações de fíler (35% e 65% em massa). A análise dos ensaios de fadiga foi feita segundo a abordagem tradicional e a abordagem baseada na energia dissipada, donde o critério de fadiga utilizado foi de 50% de redução da rigidez inicial. Enquanto Osman (2004) recorreu a ensaios de fadiga de tensão direta (DTT – *Direct Tension Test*) a 10°C e 10Hz no betume puro, em suspensões fíler-betume e em misturas betuminosas para avaliar o efeito da adição do fíler. Todos estes estudos mostraram que o efeito do conteúdo de fíler influenciava mais que o tipo de fíler no comportamento de fadiga do mástico, e que mastiques com menor concentração em fíler demonstraram um melhor desempenho à fadiga apresentando maior valor de vida de fadiga. Osman acrescentou que o pouco efeito do tipo de fíler era verificado pela proximidade das expressões da lei de fadiga definidas na expressão (2.25) e que o grande efeito do teor de fíler era justificado pelo aumento da tensão proporcional ao aumento de concentração, o que contribui para o aumento de superfície de fratura e de rigidez, observando-se o aumento do declive da lei de fadiga.

Liao (2007) e Liao et al. (2012) analisaram o efeito do teor de fíler no comportamento de fadiga, através da definição da região diluída e da região concentrada do mástico. Verificaram que os mastiques diluídos com teor em fíler de 35% apresentaram vidas de fadiga semelhantes aos apresentados pelo ligante betuminoso.

O efeito do tamanho das partículas de fíler no comportamento mecânico dos mastiques foi analisado por Osman (2004) e Ghaffarpour Jahromi et al. (2014). Ghaffarpour Jahromi et al realizaram ensaios de fadiga torsional retangular no reómetro dinâmico em amostras de mastiques betuminosos com betume puro AC-10 (iraniano penetração 60/70) e betume modificado com polímeros (polibutadieno e copolímero de estireno-polibutadieno-estireno,

SBS), obtidos pela mistura de 3 tipos de fíler (esferas de vidro, 2 tipos de calcário) a 65% de volume de fíler. Estes investigadores verificaram que o tamanho da partícula afetava bastante a vida de fadiga dos mastiques, na medida em que mastiques betuminosos com graduações mais finas de fíler exibiram um melhor desempenho de fadiga, por assumirem maior resistência à falha, justificada pelo aumento da área entre partículas por unidade de volume de fíler que influencia uma porção elevada de betume.

Além disso, Ghaffarpour Jahromi et al. (2014) também analisaram o efeito na modificação do betume e do mástico no período de fadiga. Verificaram que a vida de fadiga para os mastiques com betume modificado era superior ao do mástico puro na ordem dos 35%, ou seja apresentaram um melhor desempenho em relação à resistência à fadiga, influenciado pela adesão interfacial entre as partículas de fíler e os polímeros, promovendo a resistência da sua interface e uma melhor resistência à propagação do fendilhamento. Soenen and Eckmann (2000) e Soenen et al. (2004) também observaram que o betume modificado por polímeros apresentava melhor desempenho à fadiga que o betume puro.

Outros estudos avaliaram a capacidade de regeneração dos mastiques betuminosos, com a introdução de períodos de repouso entre ciclos de carga no comportamento de fadiga em ensaio no DSR (Lu et al., 2003; Shen et al., 2010; Ghaffarpour Jahromi et al., 2014; Pereira, 2014). Estes autores verificaram que o dano de fadiga e potencial de regeneração estão relacionados com as características dos betumes, propriedades adesivas do betume, interação entre betume e aditivos e outros fatores que afetam a evolução das micro-fendas no mástico.

Ghaffarpour Jahromi et al. (2014) avaliaram a capacidade de auto-regeneração nos mastiques betuminosos através de ensaios de torção de fadiga, com a aplicação de uma deformação de 0,3% até se atingir uma redução de 50% da rigidez inicial. A regeneração foi medida como a percentagem de recuperação da rigidez inicial após 2h de ensaio. Observou-se uma redução da vida de fadiga, denotando uma recuperação na rigidez, traduzida pela presença de micro-fendas na amostra. Verificou-se um grande efeito do tamanho das partículas de fíler tanto na fadiga como na regeneração. Os mastiques com partículas mais grossas apresentaram uma magnitude de regeneração superior em relação às mais finas. A forma do fíler constitui uma propriedade do fíler que afeta diretamente a capacidade de regeneração dos mastiques, onde mastiques com partículas regulares apresentam uma grande superfície específica, resultando num grande número de moléculas adsorvidas (maltenos e asfaltenos) as quais não conseguem difundir através das superfícies das micro-fendas, contribuindo para uma baixa capacidade de regeneração.

Na avaliação da regeneração do betume, Lu et al. (2003) utilizaram duas metodologias diferentes, o processo de recuperação com longos períodos de repouso a 0,016 deformação e 25Hz e o processo de carga intermitente. Neste método de carga intermitente, as amostras de ligantes foram sujeitas à temperatura de 15°C, a 25Hz com uma deformação inicial de 0,01 e utilizando o esquema de combinações diferentes de carga 10s carga/20s repouso e 20s carga/100s repouso.

O estudo de Shen et al. (2010) permitiu definir metodologias para quantificar a regeneração de betumes recorrendo à abordagem da energia dissipada e empregando ensaios de carga intermitente no Reómetro de Corte Dinâmico, no modo de tensão controlada. A sequência de carga intermitente aplicada foi de períodos de repouso entre 0 a 6s depois de cada 10 ciclos de carga. Os dois tipos de betume, um puro e outro modificado com polímeros, foram ensaiados às temperaturas de 15°C e 35°C a 10Hz. Verificaram que quanto maior o declive da curva PV em função dos períodos de repouso, maior a capacidade de regeneração. Para menores temperaturas, em que o betume está mais elástico, observaram menor efeito de regeneração e vida de fadiga. Sob a aplicação de maiores deformações, o material deforma-se mais, afastando as duas faces das micro-fendas, o que conduz à menor capacidade de regenerar. Os investigadores denotaram que o tipo de betume tem grande influência no potencial de regeneração, sendo que o betume modificado apresenta uma taxa de regeneração maior do que o betume puro, ou seja demora menos tempo a regenerar-se do que o betume puro, e portanto admite um melhor desempenho à fadiga.

Lu et al. (2003) e Shen et al. (2010) concluíram que o tipo de betume, nível de deformação e temperaturas têm um grande impacto na regeneração. Verificou-se que o aumento do período de repouso conduzia a um maior número de ciclos até se atingir a falha por fadiga, reduzindo o valor PV.

#### 2.4.2.2. Ensaio de fadiga a incremento sucessivo de deformação

Como referido anteriormente, os ensaios de fadiga por varrimento de tempo requerem bastante tempo, pelo que, foi desenvolvido um tipo de ensaio de fadiga dos materiais betuminosos, que permitisse minimizar o tempo utilizado nos ensaios. Este ensaio de fadiga, designado por varrimento de amplitude linear, trata-se de um método acelerado que consiste na aplicação de séries de cargas cíclicas a um aumento sucessivo de deformações, a decorrer sob uma frequência constante de 10 Hz (Johnson, 2010; Pereira, 2014).

Este tipo de ensaio, tal como o de varrimento de tempo, recorre ao reómetro de corte dinâmico, sob o modo de deformação controlado, utilizando uma geometria de pratos paralelos de 8 mm e uma espessura de 2 mm.

O ensaio de LAS é executado no DSR sob o modo de deformação controlada à mesma temperatura e frequência de carga utilizados no varrimento de tempo, no entanto a amplitude de carga é aumentada gradualmente para acelerar o dano da amostra. São aplicados 100 ciclos à deformação de 0,1% para determinar as propriedades viscoelásticas lineares não danificadas. A partir deste passo de carga surgem outros passos seguintes, cada um com 100 ciclos e um aumento gradual de 1% de deformação até atingir 20% de deformação (AASHTO TP 101-12, 2012).

Kim and Little (2005) realizaram ensaios mecânicos dinâmicos usando análise mecânica dinâmica no DSR, em amostras betuminosas de areia feitas com betume puro, betume modificado e mastiques para estimar as características viscoelásticas e comportamento de

fadiga. O dano por fadiga foi avaliado por meio de varrimento de tempo em ensaios cíclicos de deformação controlada a 25°C e 10Hz. Verificaram que a inclusão dos fíleres contribui para um aumento da rigidez e de extensão do tempo de fadiga do mastique, provocando o aumento do parâmetro de dano de fadiga  $D_f$  e do parâmetro  $k$  e redução do valor do coeficiente de regressão  $C_2$ . Observaram que o módulo dinâmico,  $G^*$ , e o parâmetro de dano acumulado,  $D_f$ , são os parâmetros que mais dominam o período de fadiga, na medida em que eles assumem grandes valores. Apesar do fíler enrijecer o betume, eles contribuem para uma melhor resistência ao micro-fendilhamento devido à baixa taxa de evolução de dano e maior tolerância na acumulação de dano total. Comparando os parâmetros do modelo do dano contínuo entre os sistemas fíler-betume de calcário e de cal hidratada, verifica-se que a cal hidratada é um fíler mais efetivo, pois contribui para uma vida de vida mais longa, uma vez que possibilita uma maior acumulação de micro-danos a partir da carga inicial até à falha.

Os mastiques mostraram possuir uma maior capacidade de acumulação de dano que os betumes. Analisando-se os parâmetros do modelo do dano mecânico contínuo, conclui-se que o betume modificado com polímero demonstra um valor mais elevado de número de ciclos até se atingir a falha por fadiga, sendo capaz de acumular mais dano antes de ocorrer a falha devido à baixa taxa de redução de rigidez (Kim and Little, 2005).

A verificação da ocorrência do dano durante o ensaio LAS é baseada na diminuição do valor de tensão de resposta para uma amplitude de deformação constante. Caso a tensão seja constante, significa que não ocorreu qualquer dano no material testado, característica dos níveis de deformação mais reduzidos.



### 3. Estudo experimental

O presente capítulo apresenta o programa experimental, nomeadamente os materiais utilizados e os ensaios realizados. Neste capítulo estão descritas as condições de ensaio aplicadas para cada tipo de ensaio usado.

Dado que o presente estudo tem como principal objetivo avaliar o efeito da adição do fíler no comportamento reológico do ligante betuminoso, optou-se por utilizar em geral as mesmas condições de ensaio utilizadas no estudo Pereira (2014).

#### 3.1. Materiais utilizados

##### 3.1.1. Ligantes betuminosos

Os ligantes betuminosos usados foram o betume de penetração 35/50 e betume modificado por adição de polímeros elastómeros termoplásticos designado por PMB 45/80-65 (PMB – *Polymer Modified Bitumen*). Nos Anexos A e B estão apresentados os certificados de qualidade dos betumes.

A adição de polímeros elastómeros termoplásticos, SBS, no betume puro 35/50 melhora as propriedades e desempenho prestado em serviço, pois o betume modificado admite também propriedades elásticas, provocadas pela reticulação dos polímeros termoplásticos constituintes (Pereira, 2014). O betume modificado com polímeros apresenta um comportamento elástico para baixas temperaturas e um comportamento termoplástico para elevadas temperaturas.

No Quadro 3.1 estão indicadas as principais propriedades convencionais dos ligantes betuminosos aplicados no presente trabalho.

Quadro 3.1 - Principais propriedades convencionais dos ligantes betuminosos estudados

Método	Propriedades	Betume 35/50	PMB 45/80-65
EN 1426	Penetração (25°C, 100g, 5s) (0,1 mm)	43	51
EN 1427	Temperatura de anel e bola (°C)	51,0	70,4

Além dos valores destas propriedades dos ligantes foi fundamental o conhecimento das massas volúmicas dos mesmos para o cálculo da formulação do mastique betuminoso. Como os certificados de qualidade dos mesmos não continham essa informação, utilizou-se a massa volúmica dos ligantes retirada da literatura (Santos, 2010), apresentada no Quadro 3.2:

Quadro 3.2 - Massa volúmica dos betumes utilizados (Santos, 2010)

Betume	Massa volúmica	
	(Mg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )
35/50; PMB 45/80-65	1,03	1030

De forma a cumprir um dos principais objetivos do presente estudo, que é a análise e comparação dos resultados dos mastiques obtidos com os relativos à caracterização reológica dos ligantes betuminosos de base realizada por (Pereira, 2014), tentou utilizar-se as

sub-amostras sobrantes do trabalho do autor. No entanto, estas foram insuficientes para formular mastiques betuminosos para a caraterização da resistência à fadiga. Pelo que foi necessário encomendar novas amostras de ligantes betuminosos oriundos da mesma refinaria fornecidas em latas metálicas de capacidade de 20L, a fim de evitar grandes discrepâncias entre os resultados obtidos dos ligantes, apesar das composições dos ligantes poderem apresentar valores ligeiramente diferentes. Os betumes foram fornecidos pela empresa Probigalp e armazenadas à temperatura ambiente até serem posteriormente subdivididas em sub-amostras.

Esta subdivisão permitiu facilitar o fabrico dos provetes dos mastiques, pois seria inadequado dividir uma lata de 20L de material viscoelástico em provetes de ensaio de reduzidas dimensões. Esta etapa foi executada consoante o estipulado pela norma NP EN 12594 (2010), indicada para amostras de capacidade superior a 5L, apresentando o seguinte procedimento:

1. Abrir uma das latas de 20L e deixar a tampa solta no interior da estufa, mas a tapar o seu interior. A temperatura de fusão do material deve ser 50°C + temperatura de amolecimento do ligante betuminoso, no entanto a fusão durante a noite deve ser executada a uma temperatura mais baixa, tendo utilizado 80°C para 35/50 e 100°C para PMB 45/80-65;
2. A 2h antes do fabrico de sub-amostras dos betumes aumentar a temperatura de fusão para os valores iniciais definidos no ponto 1., sendo 100°C para 35/50 e 130°C para PMB 45/80-65;
3. Retirar a lata do interior da estufa e colocá-la de seguida em cima de uma cama de jornal devidamente preparada no chão adjacente à estufa, de modo a evitar sujar a mesma e para que a amostra não endureça com maior rapidez;
4. Homogeneizar a mistura manualmente e cuidadosamente com o auxílio dum utensílio próprio (varão metálico), durante poucos segundos até se obter uma mistura apropriada. Para a lata com betume modificado foi necessário repetir este ponto do procedimento e voltar a colocar a lata no interior da estufa à temperatura de fusão imposta, pois este material admitia uma consistência pouco fluída, o que dificultava o processo de vertê-la para recipientes mais pequenos;
5. Verter a mistura homogeneizada em latas de dimensões mais pequenas, tendo em consideração garantir no mínimo 100 g em cada uma. Dado que a lata de 20L admite um diâmetro bastante elevado, optou-se por verter os primeiros 5L da mistura em recipientes maiores de 1L, os quais serão novamente reaquecidos, e o restante material foi vertido para latas de dimensão máxima de 0,50L com uma massa na ordem dos 400 g;
6. Identificar as várias latas com os ligantes betuminosos correspondentes e armazenar as latas em temperatura ambiente e com papel de alumínio a tapar as duas faces de cada uma.

Durante o processo de divisão em sub-amostras apenas foi requerido o reaquecimento das mesmas até duas vezes, como recomendado pela norma NP EN 12594 (2009), a fim de

impedir a perda de propriedades e de componentes voláteis dos mesmos, conduzindo a resultados reológicos distintos.

Depois de se terem produzido as sub-amostras dos ligantes betuminosos foi possível produzir os provetes de ensaio de mastique betuminosos, cujo procedimento está descrito em 3.2..

### 3.1.2. Fíleres

Os fíleres comerciais utilizados foram o calcário e a cal hidráulica, cujas denominações são RC480 e NHL5, tendo sido fornecidos pelas empresas Eurocálcio e Secil, respetivamente. As declarações de conformidade CE dos fíleres estão em Anexo B e C.

A cal hidráulica, NHL5, é uma cal natural produzida em Portugal, enquanto o calcário, RC480, é o mais utilizado no país e é um fíler comercial obtido de calcário esmagado, sendo composto por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

No Quadro 3.3 estão apresentadas algumas das caraterísticas dos fíleres utilizados no presente estudo, as quais constam do estudo realizado por Antunes (2013).

Quadro 3.3 - Propriedades dos fíleres usados no estudo (Antunes, 2013)

Fíler	Massa volúmica das partículas ( $\text{kg/m}^3$ )	Vazios de Rigden (%)	Valor Azul Metileno	Superfície específica ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )
NHL5	26900	52	1,7	671
RC480	27200	36	3,3	563

Tem-se que a cal hidráulica toma uma superfície específica superior à do calcário, mas um valor inferior em densidade das partículas.

Neste estudo é importante o conhecimento da granulometria dos fíleres estudados, nomeadamente a quantidade de material que passa no peneiro 0,063mm, por forma a identificar o fíler mais fino. Antunes (2013) determinou a sua granulometria qualitativamente, no Quadro 3.4:

Quadro 3.4 – Resultados obtidos por peneiração por jato de ar (Antunes, 2013)

Fíler	% material passado	Granulometria (mm)
NHL5	100	2
	93	0,125
	79	0,063
RC480	100	2
	93	0,125
	80	0,063

Tem-se que quanto maior for a quantidade de partículas que passa no peneiro de diâmetro 0,063mm, mais finos são os materiais, assim o fíler calcário, por uma margem bastante reduzida, é mais fino que a cal hidráulica.

Quanto à forma e textura das partículas finas de fíler, Antunes (2013) considerou que a cal hidráulica apresenta uma forma granulosa a nodular e uma textura rugosa. Quanto ao fíler calcário, este toma uma forma diversa entre angular e granulosa, para uma textura correspondente lisa e rugosa. Acrescentou que a cal hidráulica apresenta uma forte tendência das partículas se aglomerarem, ao invés do observado no calcário.

Quanto ao desempenho do fíler na mistura betuminosa, Soenen and Teugels (1999) consideraram o calcário como fíler inerte com o betume, por não demonstrarem reação química.

### 3.1.3. Mastiques betuminosos

Neste estudo produziram-se oito mastiques betuminosos, formulados com dois fileres comerciais e com dois betumes, usando duas relações fíler-betume volumétricas diferentes, de 0,25 e de 0,50. De modo a facilitar a análise dos resultados apresentados ao longo do trabalho, optou-se por recorrer às denominações definidas no Quadro 1.1, em função da percentagem de volume composicional de fíler apresentado no Quadro 3.5:

Quadro 3.5 – Identificação dos mastiques betuminosos usados no estudo experimental

<b>Mastiques</b>	<b>Fíler</b>	<b>Betume</b>	<b>(f/b)<sub>v</sub></b>
<b>B/NHL5_20%</b>	NHL5	35/50	0,25
<b>B/RC480_20%</b>	RC480	35/50	
<b>P/NHL5_20%</b>	NHL5	PMB 45/80-65	
<b>P/RC480_20%</b>	RC480	PMB 45/80-65	
<b>B/NHL5_33%</b>	NHL5	35/50	0,50
<b>B/RC480_33%</b>	RC480	35/50	
<b>P/NHL5_33%</b>	NHL5	PMB 45/80-65	
<b>P/RC480_33%</b>	RC480	PMB 45/80-65	

Com base no Quadro 3.5, os mastiques betuminosos produzidos com um volume composicional de fíler de 20% foram considerados suspensões diluídas, enquanto os restantes foram considerados suspensões concentradas. Esta consideração foi depois confirmada através da elaboração do modelo concetual de Faheem com base nos resultados experimentais e nos materiais ensaiados, na secção 4.1.3.2..

Além destes materiais essenciais para a produção dos mastiques betuminosos foram requeridos equipamentos adicionais, nomeadamente moldes de silicone com diâmetros iguais às geometrias usadas no Reómetro de Corte Dinâmico (11 moldes de silicone no total, sendo 1 de 8 mm e 10 de 25 mm de diâmetro), balança e placa de aquecimento (que permitiu homogeneizar a mistura entre o fíler e o ligante betuminoso, impedindo que esta endureça).

Na literatura podem encontrar-se estudos realizados sobre o mástico betuminoso com diferentes relações fíler-betume. No Quadro 3.6 apresentam-se as condições usadas em alguns estudos:

Quadro 3.6 - Formulações da relação fíler-betume usados nas referências bibliográficas

Métodos utilizados de f/b	Condições utilizadas	Referências bibliográficas
35% e 65% em massa de fíler	Fíleres usados: calcário, cimento e arenito Betume usado: 40/60	(Liao, 2007) (Liao et al., 2012)
Expressão de JAE (anterior)	Relação ponderal f/b=1,1 e 1,5 Granulometria (mm): 0,475 (100%); 0,18 (95-100%); 0,075 (75-100%)	(Micaelo et al., 2012)
Expressão de EP (atual), equação 1	Relação volumétrica f/b: valor médio com $\Delta T_{ab}$ 12 e 16°C Granulometria (mm): 2 (100%); 0,125 (85-100%); 0,063 (70-100%)	
35%, 50% e 65% em massa de fíler	Fíler usado: calcário	(Airey et al., 2006)
20%, 35% e 50% em massa de fíler	Fíler usado: cimento Betume usado de penetração 40	
65% em volume de fíler	Fíler usado: calcário e esferas de vidro	(Ghaffarpour Jahromi et al., 2014)
35% e 60% em volume de betume	Fíler usado: calcário, granito Betume usado: B80/100 (PG 58-28)	(Gubler et al., 1998)
20% em massa de fíler	Fíler usado: calcário Betume usado: PG 58-10	(Chen et al., 2007)
35% e 65% em massa de fíler	Fíleres usados: calcário, cimento Betume usado: 40/60	(Liao et al., 2013)
30% e 55% em massa de fíler	Fíleres usados: quartzo, riólito, riólito de tufo	(Soenen et al., 1999)

Neste trabalho optou-se por formular os mastiques betuminosos com base em duas relações volumétricas de fíler/betume, a 20% e 33,3% em volume de fíler. A determinação das relações volumétricas foi conseguida através do conhecimento das propriedades dos materiais constituintes, indicadas na secção 2.3.1, estando descrito o procedimento do cálculo no Apêndice A. Neste apêndice estão também apresentadas as quantidades em massa e em volume do fíler e do betume, bem como a relação em massa dos mastiques.

No Quadro 3.7 estão apresentados os volumes de fíler efetivo e de betume fixo e livre admitidos nos mastiques, determinados através das expressões apresentadas na secção 2.3.1.

Quadro 3.7 – Volume efetivo de fíler e volume de betume fixo e livre nos mastiques

Material	% volume efetivo em fíler	% volume de betume fixo	% volume de betume livre
B/NHL5_20%	41,7	21,7	78,3
B/RC480_20%	31,3	11,3	88,7
P/NHL5_20%	41,7	21,7	78,3
P/RC480_20%	31,3	11,3	88,7
B/NHL5_33%	69,4	36,1	63,9
B/RC480_33%	52,1	18,8	81,2
P/NHL5_33%	69,4	36,1	63,9
P/RC480_33%	52,1	18,8	81,2

### 3.2. Preparação dos provetes de ensaio de mastique betuminoso

Previamente à preparação dos provetes de ensaio determinaram-se as quantidades de ligante betuminoso e de fíler mineral a utilizar para o mastique pretendido e sua relação fíler-betume.

Por ausência de norma relativa o fabrico dos mastiques betuminosos utilizou-se a norma EN 14770 (2012), indicada para betumes, a qual define as limitações durante o dito processo, quanto à temperatura a utilizar na estufa, aos períodos de aquecimento e de armazenamento antes da desmoldagem.

Relativamente à preparação dos provetes de ensaio de mastique betuminoso é necessário reaquecer as sub-amostras obtidas anteriormente, guiando-se pelo seguinte procedimento:

1. Colocar a sub-amostra na estufa de aquecimento durante 1h sobre um tabuleiro metálico revestido de papel de alumínio e furar o papel de alumínio que cobre a mesma superiormente facilitando a entrada de calor, a uma temperatura de 90°C + temperatura de amolecimento do betume e colocar um recipiente com o fíler mineral pretendido para o fabrico do mastique;
2. Ao fim de 1 hora na estufa, retirar os materiais com auxílio dumas luvas térmicas próprias, verter primeiramente a quantidade de betume previamente determinada no recipiente metálico próprio colocado sobre a balança, e colocar de imediato a quantidade de fíler calculada previamente;
3. Depois de vertidas as quantidades exatas dos componentes do mastique, colocar o recipiente sobre um disco de aquecimento previamente aquecido e efetuar a mistura dos materiais recorrendo a um dispositivo próprio durante cerca de 10 minutos, de modo a garantir a homogeneização da mistura obtida, segundo um ritmo controlado;
4. Após terminado o período de mistura dos materiais, colocar o recipiente na estufa durante 5 minutos, para melhor uniformizar a mistura e garantir uma viscosidade mais adequada do fluido obtido;

5. Retirar o recipiente da estufa com luvas e de seguida verter de imediato a mistura obtida nos moldes de silicone, a fim de impedir que a mistura se torne menos fluída em contacto com temperatura ambiente;
6. Introduzir os moldes de silicones no frigorífico durante 10 minutos, permitindo ficarem mais solidificados, o que facilita o seu armazenamento;
7. Por fim, retirar os provetes dos moldes em silicone, envolver em papel de alumínio e guardar num recipiente em plástico no frigorífico, estando preparados para serem usados nos ensaios laboratoriais.

### 3.3. Reómetro rotacional

A reologia é a ciência que estuda o comportamento de deformação do sólido e de escoamento do fluido. Tem como objetivo estabelecer relação entre tensões, deformações e tempo (Cidade, 2005).

Os ensaios de caracterização reológica e mecânica do mastique foram realizados com recurso a um reómetro rotacional, pertencente ao CENIMAT, que quando utilizado para a realização de ensaios de corte oscilatórios (dinâmicos) com a geometria de pratos paralelos é equivalente a reómetro de corte dinâmico (DSR, *Dynamic Shear Rheometer* na terminologia anglo-saxónica). Nos ensaios oscilatórios aplicaram-se deformações relativamente baixas, de modo a assegurar que o ensaio esteja a ser conduzido na região viscoelástica linear a uma dada gama de temperatura e de frequência e a impedir a fratura da amostra.

O modo de carregamento de ensaio oscilatório pode ser de tensão controlada ou de deformação controlada. No presente trabalho, os ensaios oscilatórios foram executados sob o modo de deformação controlada, em que o reómetro aplica uma deformação na amostra e mede a tensão resultante.

Na presente dissertação utilizou-se o reómetro rotacional *Bohlin Gemini HR<sup>nano</sup>* com *software Bohlin, versão 6.51.0.3*, o qual permite o seu controlo e aquisição de dados obtidos. Nos ensaios oscilatórios usaram-se duas geometrias de pratos paralelos, uma de 8 mm e outra de 25 mm, com denominações PP8 e PP25, respetivamente.

De modo a assegurar resultados adequados obtidos pelo reómetro foi necessário averiguar o princípio do dito reómetro e suas limitações quanto à utilização.

O princípio do reómetro de corte dinâmico trata da aplicação duma força de corte oscilatória provocando uma deformação sobre a amostra de material betuminoso comprimida entre dois pratos paralelos, Figura 3.1. Este tipo de reómetro é composto por um prato inferior fixo e um paralelo que oscila em função da força de corte aplicada sobre a amostra (Read and Whiteoak, 2004).

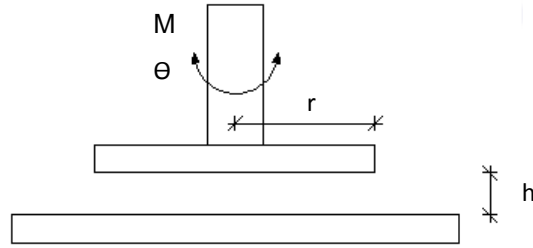


Figura 3.1 - Esquema ilustrativo do reômetro usando a geometria de pratos paralelos

A amplitude da tensão de resposta à deformação aplicada é medida através da determinação do binário (torque) transmitido ao provete de ensaio. Os coeficientes de tensão de corte,  $\tau_0$ , e de deformação de corte,  $\gamma_0$ , variam consoante o raio da geometria dos pratos paralelos, alterando em magnitude desde o centro, onde são nulos, à periferia do prato, sendo estimados através das expressões (3.1) e (3.2) correspondentes:

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot M}{\pi \cdot r^3} \quad (3.1)$$

$$\gamma_0 = \frac{\theta \cdot r}{h} \quad (3.2)$$

onde  $M$  (N.mm) é o torque ou binário,  $r$  (mm) é o raio do prato superior,  $\theta$  (rad) é ângulo de deflexão e  $h$  (mm) é a espessura (*gap* em inglês) entre os pratos paralelos.

A norma do módulo complexo, bem como os coeficientes anteriores, são estimados para o valor máximo tomado do raio do prato superior:

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} = \frac{2 \cdot M \cdot h}{\pi \cdot \theta \cdot r^4} \quad (3.3)$$

O módulo de rigidez é a relação entre a tensão e a deformação e depende do período de carga e da temperatura. Quanto maior a temperatura, menor é o valor da rigidez, pois o betume apresenta-se mais fluido.

Airey (1997) apresentou alguns fatores inerentes à utilização do reômetro de corte dinâmico que afetam os resultados obtidos, tais como a temperatura, frequência de oscilação, amplitude de deformação, nível de tensão, preparação da amostra e geometria. De modo a averiguar a precisão dos ensaios, o autor efetuou a repetibilidade dos ensaios e depois estimou o coeficiente de variação dos mesmos. Airey realizou ensaios a diversas condições de frequência e temperatura, verificando que o coeficiente de variação altera consoante a frequência e a temperatura utilizada, devido à preparação da amostra e às diferentes amostras usadas. Menores resultados dos coeficientes de variação significa que as medidas são menos sensíveis às variações associadas aos vários fatores.

Sendo que o mastique betuminoso é um material altamente suscetível à temperatura, torna-se importante utilizar um sistema de controlo de temperatura eficaz e que permita a realização de medições precisas. No reômetro rotacional utilizado, a base fixa, onde está afixado o prato inferior, está acoplada a um sistema de controlo da temperatura, *Peltier*. Segundo Airey (1997), este sistema de controlo não é tão eficaz como o sistema de banho de fluido, pois apresenta gradientes de temperatura, reduzindo a precisão dos ensaios.



A escolha da geometria de pratos paralelos a usar para os ensaios oscilatórios foi um aspeto muito importante a considerar, pois, segundo estipulado pela norma EN 14770 (2012), o prato paralelo de 8mm é utilizado para suportar valores de rigidez superiores aos do prato paralelo de 25mm. Quando o betume é submetido a baixas temperaturas e elevadas frequências utiliza-se prato paralelo de 8 mm de diâmetro com 2 mm de espessura, apresentando uma região de rigidez de 100kPa a 1MPa. Utiliza-se o prato paralelo de 25 mm de diâmetro para elevadas temperaturas e baixas frequências onde os valores de rigidez estão compreendidos entre 1kPa e 100kPa, com 1mm de gap (Airey, 1997; EN 14770, 2012).

Nos ensaios oscilatórios a deformação controlada ocorre um desfasamento entre a evolução da deformação aplicada e tensão de resposta, denominado por ângulo de fase,  $\delta$ . Esta propriedade reológica determina o grau de elasticidade do material sob as condições definidas em ensaio, podendo tomar valores entre  $0^\circ$  que representa um material puramente elástico, até  $90^\circ$ , definido como material totalmente viscoso, tornando esta propriedade fundamental para descrever as propriedades viscoelásticas do material. Quando esta propriedade toma um valor de  $0^\circ$ , significa que a resposta em tensão da deformação sinusoidal aplicada é coincidente a esta, não havendo qualquer desfasamento entre as duas curvas (Read and Whiteoak, 2004). A norma do módulo complexo,  $|G^*|$ , também conhecido por módulo de corte dinâmico, pode ser estimada através da expressão :

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (3.4)$$

Onde  $G'$  é o módulo de armazenamento e  $G''$  é o módulo dissipativo, constituindo as duas componentes do módulo complexo de corte.

O módulo de armazenamento,  $G'$ , trata da parte real do módulo complexo e descreve a quantidade de energia que é armazenada e libertada elasticamente em cada oscilação, (Airey, 1997), estimada segundo a expressão:

$$G' = G^* \cdot \cos \delta \quad (3.5)$$

A outra componente do módulo complexo,  $G''$ , corresponde à parte imaginária de  $G^*$  e é o módulo viscoso do módulo complexo que representa a energia dissipada durante a deformação, sendo determinada pela equação (3.6):

$$G'' = G^* \cdot \sin \delta \quad (3.6)$$

O módulo de corte complexo,  $G^*$ , trata da relação calculada entre o valor absoluto de pico de tensão,  $\tau^*$ , pelo valor absoluto de pico de deformação de corte,  $\gamma^*$ :

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \cdot \sin \delta) = G' + i \cdot G'' \text{ (MPa)} \quad (3.7)$$

onde  $i$  é a unidade imaginária ( $i^2 = -1$ ).

Nesta dissertação, os ensaios oscilatórios dinâmicos foram executados em condições viscoelásticas lineares, num dado intervalo de valores de deformação, de modo a assegurar que as propriedades reológicas da amostra não dependam dos níveis de deformação aplicados.

### 3.4. Ensaios de caraterização reológica dos mastiques betuminosos

Os ensaios de caraterização reológica realizados pretendem avaliar as propriedades reológicas fundamentais dos materiais em estudo, nomeadamente em condições de serviço. Os resultados obtidos foram utilizados em diversas representações gráficas para avaliar o comportamento reológico.

A preparação da amostra de mástico betuminoso no reómetro, antes da execução do ensaio, foi a seguinte:

1. Ligar o ar comprimido e de seguida ligar o reómetro;
2. Introduzir a geometria pretendida;
3. Abrir o *software Bohlin* versão 6.51.0.3 no computador, definindo a geometria a utilizar e o tipo de ensaio requerido;
4. Efetuar o zero *gap*, recorrendo ao *software*, à temperatura média das temperaturas usadas no ensaio;
5. Subir o prato a 1  $\mu\text{m}$ , para aumentar a temperatura entre os 2 pratos, a fim de evitar a ocorrência de quaisquer danos nos pratos associados à dilatação do seu material metálico e a permitir uma melhor adesão do material aos pratos paralelos;
6. Subir o prato, introduzindo no *software* o valor de *gap* a utilizar no ensaio respetivo à geometria utilizada, com uma folga adicional de 0,5 mm, para retirar o excesso de mástico. Para pratos de 8 mm utilizar *gap* de 2mm + 0,5mm, e de 25mm utilizar 1 mm + 0,5mm;
7. Colocar a amostra ao centro do prato inferior;
8. Baixar o prato superior ao valor de *gap* referido no passo 7.;
9. Por fim, baixar o prato ao valor do *gap* de ensaio e tapar a amostra com a ratoeira de *Peltier*, para confinar a temperatura de ensaio naquele espaço definido, evitando perdas de calor ao longo do decorrer do ensaio;
10. No *software* introduzir valores de temperaturas decrescentes a um ritmo de 5°C/min, até se alcançar o valor de temperatura definido para o ensaio.

Após finalizado este procedimento, o provete de ensaio foi sujeito a um período de equilíbrio térmico de 10 minutos, com o intuito de estabilizar a temperatura de ensaio.

Dado que não existem quaisquer normas relativas à caraterização reológica do mástico betuminoso seguiram-se os procedimentos indicados na norma europeia EN 14770-2012 para ligantes betuminosos. A norma recomenda a utilização da geometria de pratos paralelos, com diâmetro de prato de 8mm e com um afastamento entre pratos de 2 mm ou 2000  $\mu\text{m}$ , com valores de rigidez entre 100kPa e 10MPa; com o diâmetro de 25mm é recomendado aplicar-se um afastamento entre pratos de 1 mm e é válido para valores de rigidez compreendidos entre 1kPa e 100kPa. A norma refere ensaios a temperaturas de 5 a 75°C, mas, visto o mástico betuminoso ser um material mais rígido que o ligante betuminoso devido à incorporação de partículas minerais finas, optou-se por aplicar temperaturas compreendidas entre os 25°C e 75°C (Airey et al., 2003; EN 14770, 2012).

Os ensaios dinâmicos de caracterização reológica dos mastiques betuminosos executados na presente dissertação foram ensaios com varrimento de deformação e com varrimento de frequência.

#### 3.4.1. Ensaios de varrimento de deformação

Nos ensaios dinâmicos de varrimento de deformação sob modo de deformação controlada, a deformação é progressivamente incrementada resultando numa diminuição da tensão de reposta.

Os ensaios de varrimento de deformação permitiram determinar valores de deformação dentro da região viscoelástica linear, em que o módulo de corte complexo,  $G^*$ , atinge uma redução de 95% do seu valor inicial (Tadros, 1996; Airey et al., 2003; Liao, 2007). Nesta região, os parâmetros reológicos são independentes da deformação aplicada.

As condições de ensaio utilizadas nos ensaios de varrimento de deformação foram as seguintes:

- Temperaturas de ensaio: 25°C e 55°C para a geometria de pratos paralelos PP8, e 45°C e 75°C para PP25;
- Deformação: crescente de 0,02% a 20%;
- Frequências de ensaio: 10Hz para as temperaturas mais reduzidas e 0,1Hz para as temperaturas mais elevadas registadas nos dois pratos paralelos;
- Tipo de ensaio: ensaio oscilatório;
- Espaçamentos usados: prato paralelo PP8 com 2mm de gap e prato paralelo PP25 com 1mm de gap.

#### 3.4.2. Ensaios de varrimento de frequência

Depois de determinados os valores de deformação limite da região LVE, realizaram-se as medições reológicas através de varrimentos de frequência, onde é aplicada uma deformação fixa dentro desta região.

Abaixo estão indicadas as condições de ensaio de varrimento de frequência utilizadas:

- Temperaturas de ensaio: 25°C a 75°C, em intervalos de 10°C;
- Deformação: com base nos resultados dos valores limite de deformação viscoelástica lineares obtidos nos ensaios de varrimento de deformação;
- Frequências de ensaio: 0,1Hz a 10Hz;
- Modo de carregamento: deformação controlada;
- Geometrias e espaçamentos usados: prato paralelo PP8 com 2mm de gap e prato paralelo PP25 com 1mm de gap.

É de se salientar que se utilizaram temperaturas de ensaio distintas para os dois pratos paralelos, pois o prato paralelo PP8 suporta valores de rigidez mais elevados que o prato

PP25, e, portanto, utilizaram-se as temperaturas de 25°C a 55°C para o prato PP8 e de 45°C a 75°C para o PP25, como estipulado na norma NP EN 14770 (2012).

Com base nos resultados obtidos do varrimento de frequência foi possível elaborar várias representações gráficas, como as isócronas, isotérmicas, digramas de Black e curvas mestras. As curvas mestras são métodos de caraterização e análise dos resultados obtidos com base nas condições de carga de tráfego típicas, onde as tensões e deformações de resposta estão dentro da gama viscoelástica linear. A sua construção baseia-se no Princípio da Sobreposição Tempo-Temperatura (traduzido em inglês *TTSP – Time-Temperature Superposition Principle*), o qual relaciona a equivalência entre a temperatura e a frequência ou tempo de carregamento. Este princípio consiste em mover as curvas isotérmicas obtidas para a mesma gama de frequências, através de fatores de translação horizontais,  $a_T(T_i)$ , até se gerar uma só curva contínua a frequência reduzida, sob uma dada temperatura de referência.

Segundo Airey (1997), os valores dos fatores de translação fornecem a indicação da evolução de alteração das propriedades viscoelásticas da amostra ao longo das temperaturas ensaiadas. Os fatores de deslocamentos,  $a_T(T_i)$  podem ser ajustados manualmente ou podem ser obtidos a partir de expressões, como a equação de *Williams Landel and Ferry* (WLF) utilizada em Airey (1997), Liao (2007), Yussof (2012) e Pereira (2014).

Anderson et al. (1992) verificaram que os fatores de deslocamento eram pouco sensíveis à adição de finos, indicando que a dependência da temperatura do mastique e do betume é igual. Di Benedetto et al. (2004) adotaram iguais valores dos fatores de deslocamento usados no betume e na mistura.

Na curva mestra é utilizada a frequência reduzida,  $f_r$ , obtida como:

$$\log f_r = \log f + \log a(T) \quad (3.8)$$

Contudo este tipo de representação foi apenas gerado depois de se traçarem os diagramas de Black, que relaciona as duas propriedades reológicas, o módulo complexo de corte e o ângulo de fase, pois com base na sua representação é possível selecionar as geometrias de pratos paralelos a usar para as respetivas temperaturas.

### 3.5. Ensaios de avaliação da resistência à fadiga dos mastiques betuminosos

Um dos outros objetivos da presente dissertação é analisar o efeito do fíler na resistência à fadiga e da capacidade auto-regeneradora dos ligantes betuminosos.

Os ensaios de fadiga contínuos, onde o carregamento é mantido continuamente, foram realizados no reómetro rotacional, e tal como nos ensaios de caraterização reológica, efetuou-se o procedimento de ensaio prévio estipulado no subcapítulo 3.4..

Nestes ensaios utilizaram-se as sub-amostras de betume produzidas neste trabalho.

Neste trabalho utilizaram-se ensaios de fadiga a deformação controlada e os ensaios de fadiga com incremento de deformação.

Tal como nos ensaios de caracterização reológica dos mastiques, os resultados apresentados resultam da média de 3 medidas. No entanto, por vezes, foi necessário efetuar mais medições, pois o coeficiente de variação dos resultados para a vida de fadiga do material era superior a 20%.

### 3.5.1. Ensaios de fadiga a deformação controlada

Os ensaios de fadiga a deformação controlada são caracterizados pela aplicação de uma deformação fixa. Neste tipo de ensaio realizaram-se dois tipos de ensaio, o ensaio a deformação contínua e o ensaio a deformação descontínua. Nos ensaios de fadiga a deformação descontínua foi avaliada a capacidade de auto-regeneração dos mastiques através da aplicação de carregamento intermitente, com a introdução de períodos de repouso relativamente curtos.

Realizaram-se ensaios de fadiga a deformação contínua a três deformações diferentes, 1,2%, 1,6% e 2%, para se estabelecer lei de fadiga para cada material. Deste modo, as condições de ensaio aplicadas para este tipo de ensaio foram as seguintes:

- Tipo de ensaio: ensaio oscilatório no modo de deformação controlada;
- Deformações utilizadas: 1,2%, 1,6% e 2%;
- Frequência: 10Hz;
- Temperatura: 25°C;
- Geometria e espaçamento entre pratos: PP8 com espaçamento de 2mm.

Recorreram-se a estes valores de deformação, pois, além de serem valores suficientemente reduzidos, para não provocar quaisquer danos nos provetes de ensaio, foram os mesmos utilizados em Pereira (2014), o que possibilita a avaliação da influência do fíler no que concerne à resistência à fadiga dos ligantes betuminosos. No entanto, Pereira (2014) realizou ensaios de fadiga a uma temperatura diferente da utilizada no presente estudo, a 15°C, pelo que não se comparou os resultados de fadiga entre os ligantes e os mastiques betuminosos, apenas se analisou quanto à forma e posição relativa entre os resultados obtidos.

Quanto aos ensaios de fadiga a deformação descontínua utilizaram-se os mesmos períodos de repouso usados no trabalho de Pereira (2014), sendo 4s, 8s e 16s, considerando-se, pois, ensaios do tipo intermitente. Para os mastiques betuminosos compostos por betume 35/50 usaram-se os 3 períodos de repouso, enquanto para os mastiques com betume modificado PMB 45/80-65 usou-se apenas os períodos mais curtos, 4s e 8s, uma vez que o período de ensaio usado nestes mastiques é bastante mais extenso quando comparado com os mastiques de betume puro.

Para este tipo de ensaio de fadiga aplicou-se primeiramente a deformação mais reduzida de 1,2%, pois permite evidenciar melhor o fenómeno de auto-regeneração. Contudo, após se ter concluído os ensaios a 1,2%, verificou-se que alguns resultados eram inconclusivos, pois alguns mastiques não atingiram a fadiga no período de ensaio estipulado, nomeadamente os

mastiques betuminosos modificados, impedindo de se estabelecer lei de fadiga para esses materiais. Assim, realizaram-se mais ensaios deste tipo para todos os mastiques betuminosos, inclusive para os ligantes betuminosos, a uma deformação de 2%. Esta deformação mais elevada permitiu reduzir o período de ensaio e estabelecer as leis de fadiga para todos os materiais.

Nos dois tipos de ensaios a deformação controlada, a análise efetuada dos resultados obtidos foi feita com base em duas abordagens de avaliação da fadiga, a abordagem tradicional e a abordagem a energia dissipada. Tem-se que nestes ensaios se admitiram uma quantidade máxima de pontos em cada ensaio de 1000, o que perfaz um valor máximo de números de ciclos de 100.000.

### **3.5.2. Ensaios de fadiga com incremento sucessivo de deformação**

Ao contrário dos ensaios de fadiga referidos anteriormente, a preparação destes ensaios foi feita com base na norma AASHTO TP 101-12 (2012). Estes ensaios foram realizados por varrimento de deformação linear (LAS), cuja duração de ensaio é bastante mais curta.

O ensaio de fadiga com incremento sucessivo de deformação foi realizado em duas fases, empregando uma temperatura de ensaio de 25°C e usando uma geometria de pratos paralelos PP8 com 2mm de espaçamento.

Numa primeira fase realizou-se o varrimento de frequência, caracterizado pela aplicação de uma carga de corte oscilatória ao longo de uma gama de frequências, que permitiu obter a informação quanto às propriedades reológicas dos materiais testados. A partir dos resultados obtidos nesta primeira fase foi possível determinar-se o parâmetro  $\alpha$ , que trata da informação quanto às propriedades do material não danificado. No varrimento de frequência aplicou-se uma deformação de 0,1%, entre 0,1 a 30Hz.

A fase posterior trata do varrimento de deformação em deformação controlada, usando uma frequência de 10Hz. O esquema de carga utilizado para esta fase consistiu na aplicação de 10 segundos de intervalo para cada valor crescente de deformação constante, de 0,1 a 30%. Contudo, após se terem efetuados os ensaios para todos os materiais estudados, verificaram-se alguns erros registados no reómetro para valores mais elevados de deformação, nomeadamente a partir da deformação 20%, pelo que se utilizou um varrimento de deformação até ao valor de 19%.

A vida de fadiga para cada material foi determinada com base no estipulado pela norma referida acima e na equação (2.24).

## 4. Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização reológica e de avaliação da resistência à fadiga, e comparados com os resultados dos ligantes betuminosos obtidos por Pereira (2014), de modo a avaliar-se o efeito do fíler no comportamento do mástico. Estes resultados foram obtidos a partir da média de três ensaios para cada condição e material de ensaio, por forma a garantir a sua repetibilidade.

Além de se apresentarem os resultados experimentais são utilizados alguns modelos reológicos de previsão do efeito de rigidez de fíler na suspensão fíler-betume, por forma a analisar o seu ajustamento aos resultados obtidos.

### 4.1. Resultados dos ensaios de caracterização reológica dos mastiques betuminosos

#### 4.1.1. Limites Viscoelásticos Lineares

Com base nos resultados obtidos do varrimento de deformação foi possível determinar os valores limites de deformação dentro da região viscoelástica linear (LVE – *Linear Viscoelastic Range* em inglês). Estes limites LVE são determinados quando se atinge a redução do módulo de corte complexo de 5% do seu valor inicial, estando apresentados na Figura 4.1:

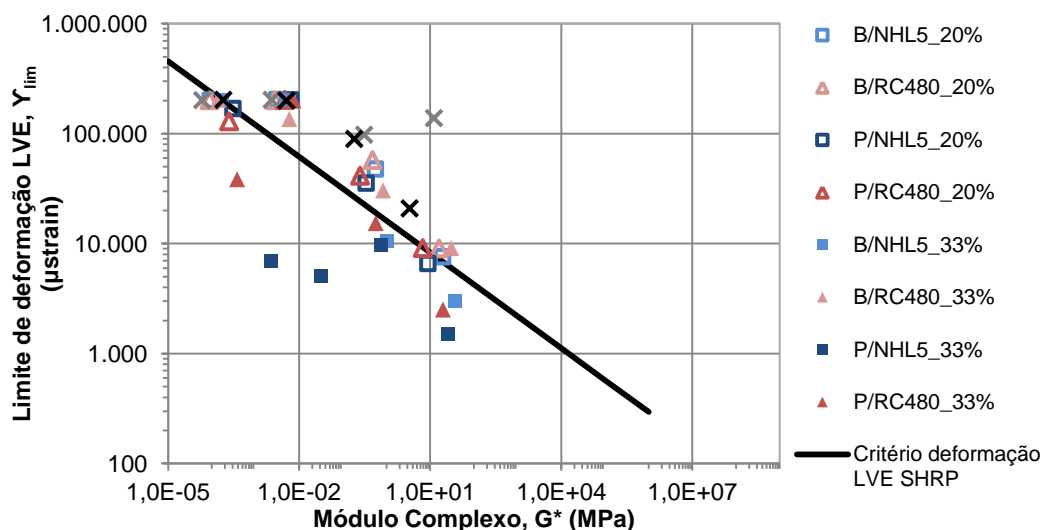


Figura 4.1 – Limites de deformação linear ( $\gamma_{lim}$ ) dos mastiques e betumes estudados

Nesta representação utilizou-se a referência do critério de deformação estabelecido pelo Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (SHRP - *Strategic Highway Research Program*) definida pela especificação A-370 (Petersen et al., 1994; Liao, 2007). A especificação SHRP A-370 estabeleceu uma expressão, donde os valores limites de deformação LVE são controlados a  $\pm 20\%$  em função do módulo complexo  $G^*$ :

$$\gamma = \frac{12}{(G^*)^{0,29}} \quad (4.1)$$

onde  $\gamma$  é deformação de corte (%) e  $G^*$  é o módulo complexo em kPa. Este critério trata duma representação conservativa, que compara os resultados das propriedades reológicas obtidos dos materiais estudados.

Analisando a Figura 4.1 pode constatar-se que, em geral, tanto para os mastiques como para os betumes, quanto maior for o módulo complexo ( $G^*$ ), menor é o valor da deformação limite, situação que corresponde ao ensaio efetuado à temperatura mais baixa a 25°C e mais elevada frequência. Os mastiques betuminosos estudados apresentaram uma tendência semelhante aos resultados dos ligantes betuminosos.

Constata-se também que os resultados de  $\gamma_{lim}$  dos mastiques betuminosos com maior concentração de fíler, se situam predominantemente abaixo da reta SHRP que define o critério de deformação, pois como o material é mais rígido, pelo facto de ter incorporado mais fíler, apresenta um menor valor de módulo complexo ao mesmo valor de deformação quando comparado com mastique com menor conteúdo em fíler. Liao (2007) e Liao et al. (2013) observaram a mesma situação nos seus resultados, acrescentando que estes sistemas são denominados por suspensões concentradas, justificados pela presença de contacto físico entre partículas de fíler.

Os resultados dos mastiques com concentração de fíler em volume de 20% são menos rígidos, pelo que os ligantes betuminosos se apresentam acima da linha de SHRP, significando que aguentam maiores deformações dentro da região viscoelástica linear que as suspensões concentradas. Nestas suspensões diluídas, as partículas finas estão dispersas no meio viscoelástico sem ocorrer contacto entre si, ou seja, não há interações hidrodinâmicas.

Os resultados de deformação limite linear das suspensões concentradas são inferiores aos das suspensões diluídas, devido ao aumento da resposta elástica, provocado pela inclusão de um maior teor de elementos elásticos rígidos, conduzindo a um material mais rígido. A redução dos limites lineares é resultado da interação entre as partículas, observando-se, assim, uma grande influência quanto ao conteúdo em fíler. Os resultados não mostraram distinção entre o fíler ativo e inerte, sendo insensível ao tipo de fíler.

Verifica-se alguma influência no tipo de betume utilizado, para a situação de baixas temperaturas ou elevadas frequências, onde os resultados de B/NHL5\_33% e B/RC480\_33% admitem uma deformação LVE maior do que os mastiques P/NHL5\_33% e P/RC480\_33%, devido à presença de interação entre os polímeros e o fíler, o que confere maior rigidez e elasticidade ao mastique. Esta situação não é observada para os mastiques diluídos, dado que as partículas de fíler e os polímeros estão suspensos no meio viscoelástico.

Na Figura 4.2 estão representados os valores limite-deformação viscoelásticos em função das temperaturas ensaiadas. Para elevadas temperaturas apresentam-se maiores valores de deformação aplicada. À temperatura de 25°C, todos os materiais viscoelásticos apresentam um valor de deformação limite inferior a 2,5%, sendo que os ligantes betuminosos registam o maior valor. A 45°C está evidente a evolução de deformação limite nos materiais estudados, verificando-se que os mastiques mais rígidos apresentam valor mais reduzido de deformação



limite em relação aos mastiques mais diluídos e aos betumes, devido à influência do esqueleto mineral presente no composto. Os betumes apresentam sempre valores de deformação LVE maiores, pelo facto de possuírem um comportamento menos elástico.

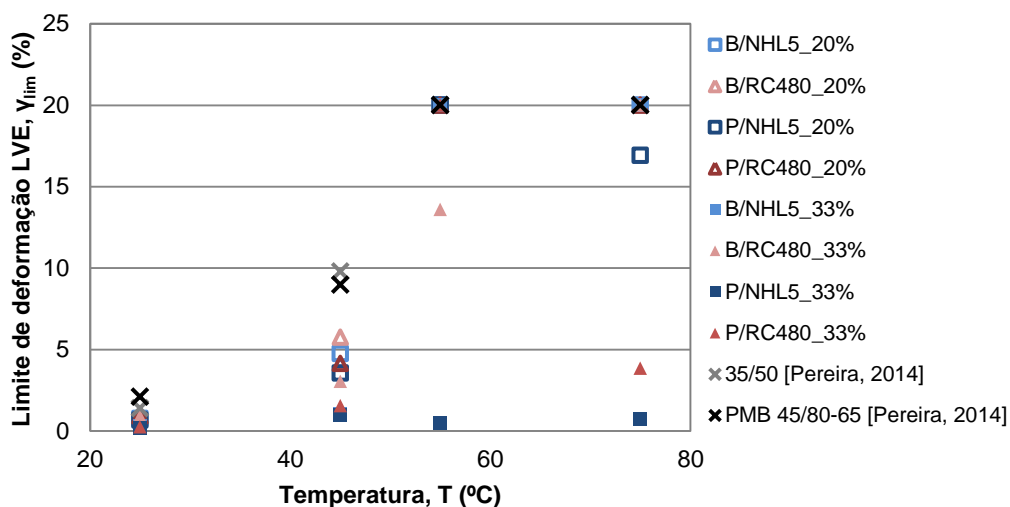


Figura 4.2 – Valores de deformação limite ( $\gamma_{lim}$ ) dos mastiques e dos betumes em função da temperatura

Nestas condições, a relação entre a tensão e a deformação depende apenas da temperatura e da frequência ou período de carga utilizados nos ensaios laboratoriais, assegurando que os ensaios estão a ser executados dentro da região viscoelástica linear (Liao et al., 2013).

#### 4.1.2. Representação das propriedades reológicas

Com base nos resultados obtidos das deformações lineares apresentados em 4.1.1. é possível efetuar-se a caracterização reológica dos mastiques betuminosos através de ensaios oscilatórios executados no reómetro rotacional, dentro da região viscoelástica linear. A partir dos resultados dos ensaios de varrimento de deformação utilizou-se uma deformação fixa de 0,5% para as condições de ensaio de varrimento de frequência para mastiques diluídos e mastique B/RC480\_33%, tal como utilizado no trabalho de Pereira (2014). Contudo para os restantes mastiques concentrados usou-se uma deformação de 0,2%, pois, como os mastiques mais diluídos são menos rígidos, ou seja, admitem valores de módulo complexo mais reduzidos, significa que suportam maiores deformações.

Neste trabalho realizaram-se ensaios oscilatórios de varrimento de frequência, os quais permitiram traçar variadas representações das propriedades reológicas, como isócronas, isotérmicas, diagramas de Black e curvas mestras. As condições aplicadas nos ensaios oscilatórios de varrimento de frequência estão apresentadas na secção 3.4.2..

Por forma a avaliar-se a influência do filler no comportamento reológico do ligante betuminoso, optou-se por subdividir a análise dos resultados dos ensaios oscilatórios dinâmicos em 3 categorias diferentes, apresentadas no Quadro 4.1:

Quadro 4.1 - Divisão em categorias para análise dos resultados experimentais

<b>Categorias</b>	<b>Mastique betuminoso</b>	<b>Ligante betuminoso</b>
<b>Influência do tipo de ligante betuminoso</b>	B/NHL5_20%	35/50
	P/NHL5_20%	PMB 45/80-65
	B/RC480_20%	35/50
	P/RC480_20%	PMB 45/80-65
	B/NHL5_33%	35/50
	P/NHL5_33%	PMB 45/80-65
	B/RC480_33%	35/50
	P/RC480_33%	PMB 45/80-65
<b>Influência do tipo de fíler</b>	B/NHL5_20%	35/50
	B/RC480_20%	35/50
	P/NHL5_20%	PMB 45/80-65
	P/RC480_20%	PMB 45/80-65
	B/NHL5_33%	35/50
	B/RC480_33%	35/50
	P/NHL5_33%	PMB 45/80-65
	P/RC480_33%	PMB 45/80-65
<b>Influência do conteúdo de fíler</b>	B/NHL5_20%	35/50
	B/NHL5_33%	35/50
	B/RC480_20%	PMB 45/80-65
	B/RC480_33%	PMB 45/80-65
	P/NHL5_20%	35/50
	P/NHL5_33%	35/50
	P/RC480_20%	PMB 45/80-65
	P/RC480_33%	PMB 45/80-65

## 4.1.2.1. Curvas isotérmicas

As curvas isotérmicas são representações das propriedades viscoelásticas em função da frequência de ensaio. Apesar de se terem efetuado varrimentos de frequência entre 25°C e 75°C a cada 10°C, optou-se por apresentar as curvas isotérmicas relativas às temperaturas 25°C, 55°C e 75°C em função do módulo complexo,  $G^*$ , e do ângulo de fase,  $\delta$ , nas Figuras 4.3 e 4.4.

A partir da Figura 4.3 verifica-se que quanto maior a temperatura, menor é o valor de módulo complexo,  $G^*$ . Nas três ilustrações observa-se que a frequências elevadas ou períodos de carga mais baixos registam-se módulos de rigidez mais elevados. Denota-se que para a temperatura mais baixa, as curvas isotérmicas dos mastiques betuminosos tomam sensivelmente o mesmo declive que as dos respetivos ligantes betuminosos de base, verificando-se um afastamento progressivo no declive à medida que a temperatura aumenta. Não obstante estas curvas estão afastadas entre si devido ao efeito de rigidez inerente às partículas sólidas elásticas. Constata-se que a 25°C, os mastiques com betume puro tomam valores superiores de módulo de rigidez em relação aos modificados para a mesma frequência,

devido ao seu comportamento mais viscoso, evidenciando o efeito do tipo de betume. No entanto, para 55°C e 75°C ocorre a situação inversa, onde os mastiques modificados admitem rigidezes superiores, principalmente as suspensões mais concentradas P/NHL5\_33% e P/RC480\_33%, não sendo justificadas pelo efeito do tipo de betume, mas pelo efeito do conteúdo em fíler e pela interação entre polímeros e partículas.

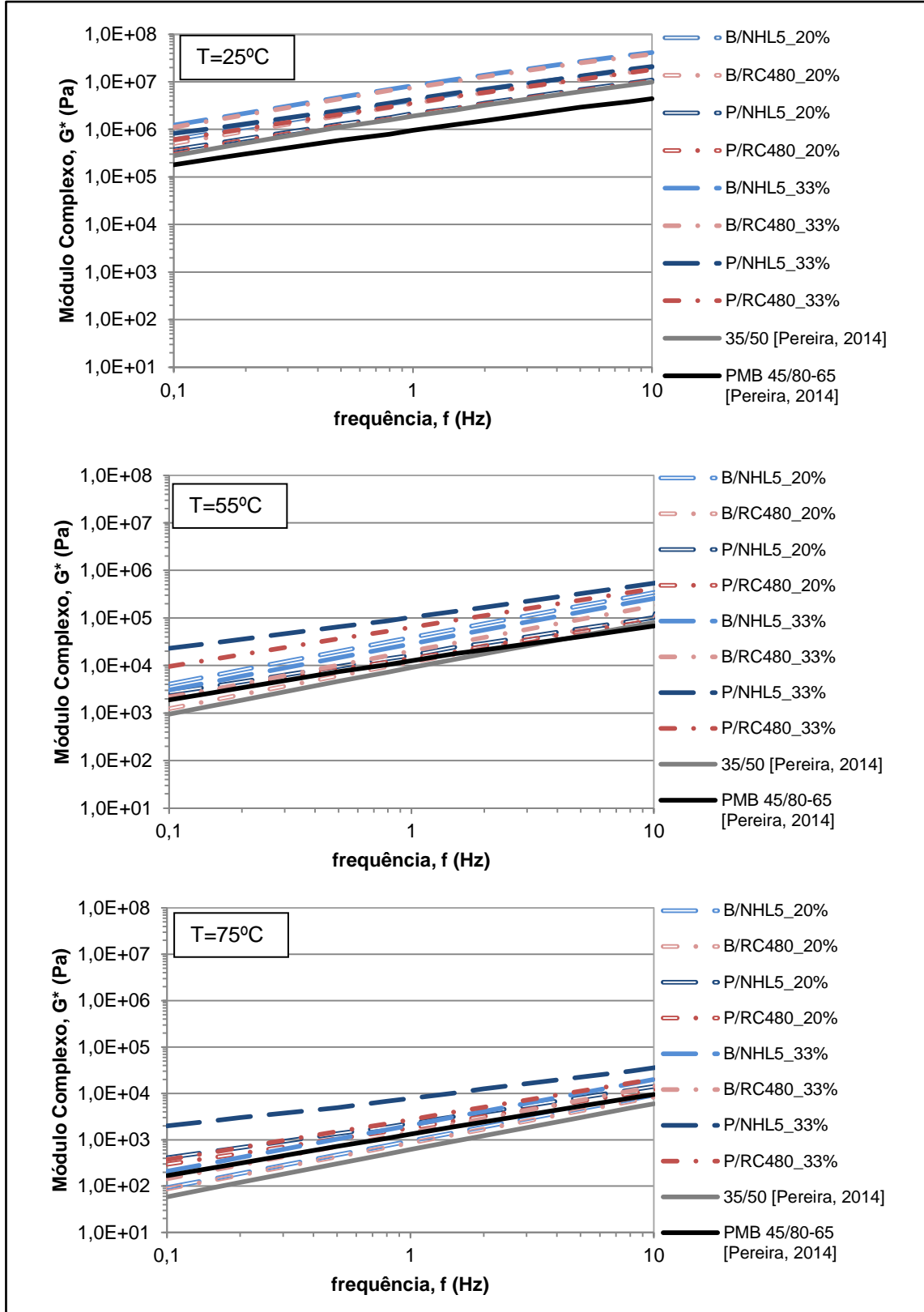


Figura 4.3 – Curvas isotérmicas do módulo complexo dos betumes e mastiques a 25°C, 55°C e 75°C

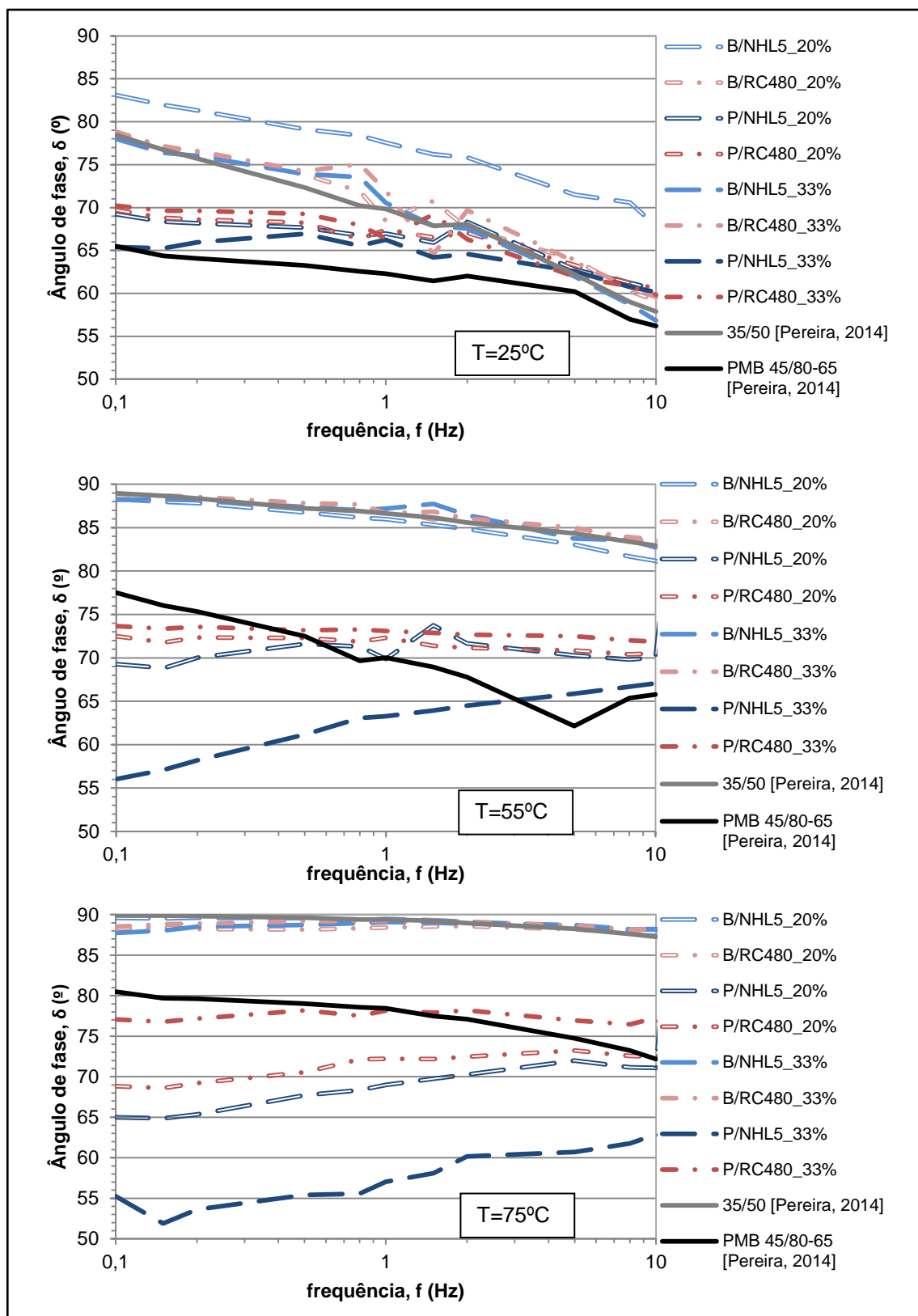


Figura 4.4 – Curvas isotérmicas do ângulo de fase nos betumes e mastiques a 25°C, 55°C e 75°C

Na Figura 4.4 verifica-se a aproximação das isotérmicas dos mastiques às do ligante betuminoso base com o aumento da temperatura, evidenciando melhor a sua natureza reológica. Donde os mastiques diluídos, compostos por um teor em fíler de 20% em volume, apresentam valores de ângulo de fase mais elevados do que os mastiques concentrados, pois a presença de maior quantidade de fíler contribui para um comportamento mais elástico do composto. Contudo, verifica-se que o mástico P/RC480\_20% apresenta um comportamento mais elástico que o mástico P/RC480\_33%, constituindo uma situação não esperada.

Os mastiques modificados apresentam valores de ângulo de fase inferiores aos respetivos mastiques compostos por betume puro devido à interação entre as partículas de fíler minerais elásticas e os polímeros. Observa-se que os mastiques com cal hidráulica tomam valores mais elásticos do parâmetro reológico que os mastiques com calcário, pelo facto da cal hidráulica ser fíler ativo, denotando-se uma maior interação entre as partículas e os polímeros do que com fíler inerte, calcário.

#### 4.1.2.2. Curvas isócronas

As curvas isócronas representam as propriedades reológicas em função das temperaturas ensaiadas. Para este tipo de representação optou-se por exibir isócronas a 0,1 Hz, 1Hz e a 10Hz, em função do módulo complexo, na Figura 4.5, e ângulo de fase, na Figura 4.6.

Tanto nos mastiques como nos betumes verifica-se uma diminuição no módulo complexo, à medida que a temperatura aumenta, na Figura 4.5. Em geral quando se aplica uma frequência de carga maior, o módulo de rigidez aumenta. Para baixas temperaturas, os mastiques com betume 35/50 possuem um valor de módulo complexo superior ao das suspensões modificadas, sendo mais evidente esta diferença para a frequência de 10Hz, enquanto para elevadas temperaturas ocorre a situação oposta, onde os sistemas modificados possuem um módulo complexo maior e sendo mais evidente para frequência 0,1Hz. O efeito do fíler mineral é mais evidente a 0,1Hz e 75°C, onde os mastiques concentrados admitem maior rigidez que os mastiques diluídos e ligantes betuminosos correspondentes.

Na Figura 4.6 é possível distinguir-se claramente as suspensões com betume puro das suspensões modificadas, em que as primeiras são caracterizadas pelo aumento proporcional entre a temperatura e o ângulo de fase, o que significa que se vão tornando mais viscosos. Na mesma ilustração, o mástico com cal hidráulica, em particular a concentrada, P/NHL5\_33%, admite valores bastante reduzidos da propriedade reológica que o betume modificado para temperaturas elevadas, devido à interação entre partículas de fíler ativo e polímeros SBS e à interação entre os aditivos introduzidos ao ligante e o conteúdo asfalteno, pois este tipo de fíler admite maior capacidade de aglomeração que o calcário.

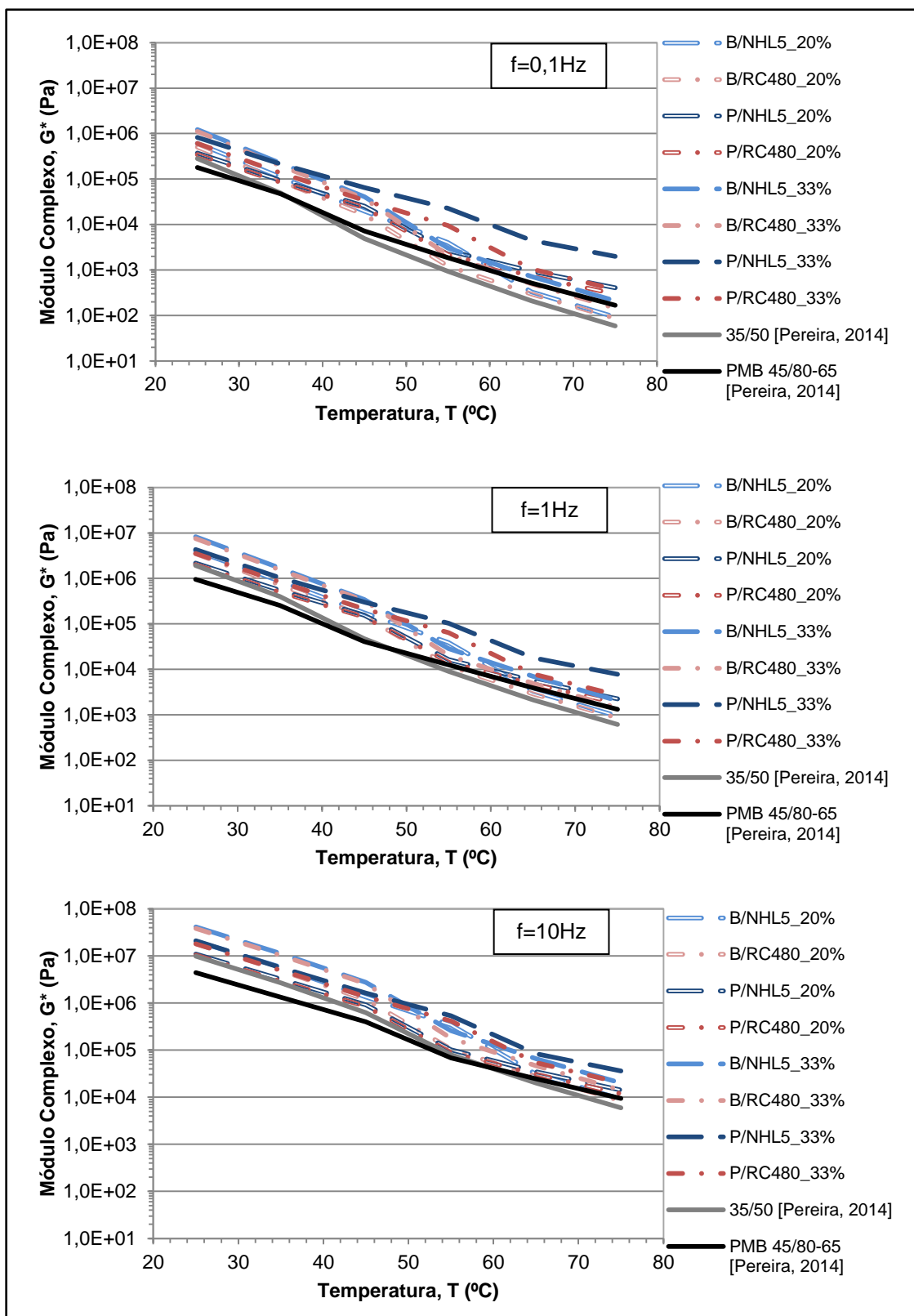


Figura 4.5 – Isócronas do módulo complexo dos betumes e mastiques a 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz

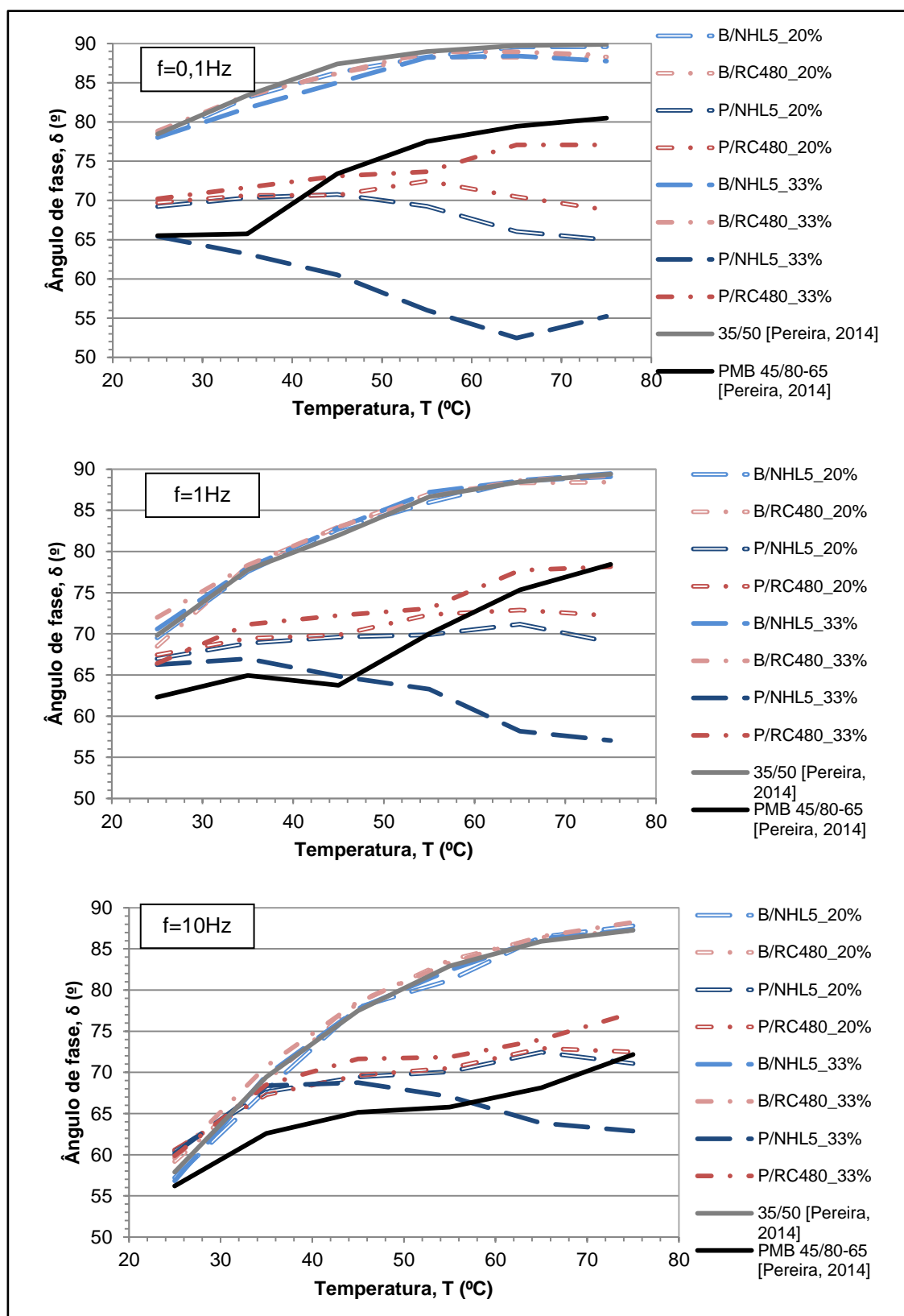


Figura 4.6 – Isócronas do ângulo de fase dos betumes e mastiques a 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz

## 4.1.2.3. Diagramas de Black

No presente trabalho traçaram-se Diagramas de Black dos mastiques estudados, com o intuito de determinar qual a geometria a usar para as temperaturas de ensaio 45°C e 55°C, uma vez que, por vezes, as geometrias não são as mais adequadas para certos valores de frequências e temperaturas. A seleção das geometrias foi efetuada com base nos resultados obtidos do módulo complexo. Posto isto, realizaram-se varrimentos de frequência para a geometria de 8mm para as temperaturas entre os 25°C e os 55°C, e para a geometria de 25 mm ensaiou-se para as temperaturas entre os 45°C e os 85°C. Os diagramas de Black são curvas que relacionam as duas propriedades reológicas, ângulo de fase e módulo complexo, constituindo, assim, uma importante representação para a caraterização reológica dos materiais viscoelásticos.

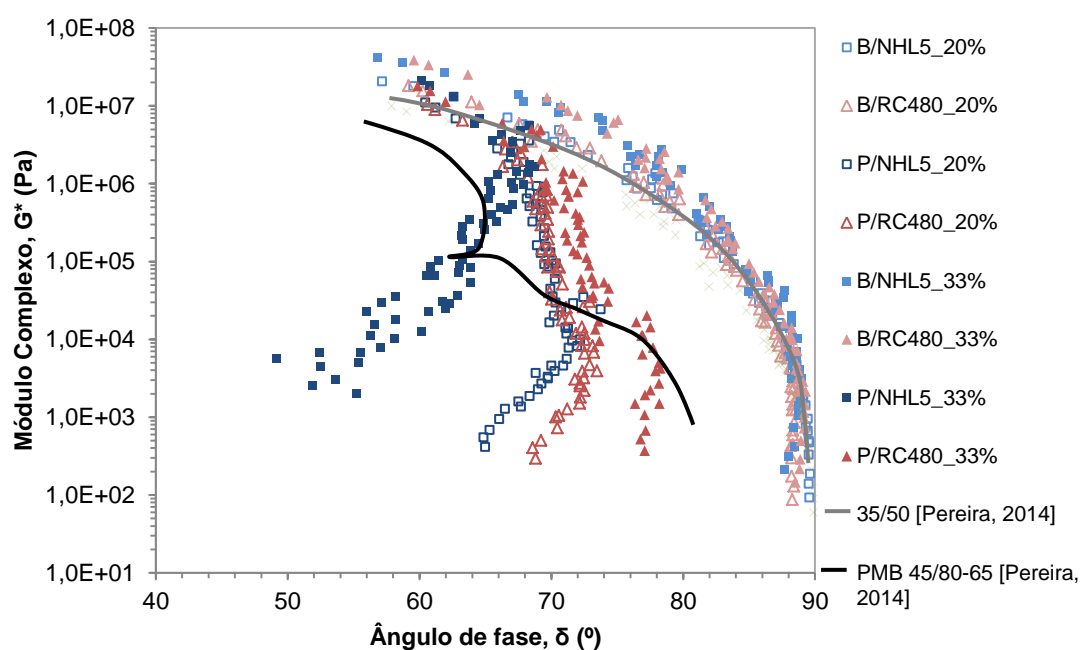


Figura 4.7 – Diagramas de Black dos mastiques betuminosos

- Influência no tipo de ligante betuminoso

Quanto à influência do tipo de betume nos Diagramas de Black, observando-se a partir da Figura 4.7 que os resultados dos mastiques tomam um comportamento semelhante ao do betume respetivo, sendo esta semelhança mais evidente nos mastiques com betume puro. Verifica-se que os mastiques modificados tomam valores mais reduzidos de ângulo de fase para a situação de elevadas temperaturas e baixas frequências, no canto inferior direito. Esta situação é esperada devida à interação entre os polímeros e o conteúdo asfalteno do betume modificado e à interação entre o betume adsorvido e partículas de filler.

Observa-se que os mastiques com calcário apresentam o efeito da adição de filler para elevadas temperaturas, denotando valores reduzidos de ângulo de fase, observado no canto inferior direito. Nesta figura denota-se a influência do tipo de betume para mastiques com



calcário, pois os mastiques puros e modificados apresentam comportamento distintos entre si, no entanto similares às dos ligantes base.

- Influência no tipo de fíler

Na Figura 4.7 não se observa o efeito do tipo de fíler para mastiques com 35/50. Apenas se verifica uma ligeira translação das curvas de mastique em relação à curva de ligante betuminoso, devido ao aumento da rigidez do sistema fíler-betume para altas temperaturas, observado no canto inferior direito da Figura 4.7.

No entanto verifica-se um grande efeito no tipo de fíler para as suspensões modificadas, devido ao facto de assumirem resultados distintos. Os mastiques com cal hidráulica apresentam comportamento mais elástico a elevadas temperaturas e baixas frequências que os mastiques com calcário, observado no canto inferior direito da Figura 4.7, devido à forte interação entre as partículas elásticas e o conteúdo de ligante betuminoso admitida pelo fíler cal hidráulica ativo.

- Influência no conteúdo em fíler

Na Figura 4.7 verifica-se que o comportamento viscoelástico dos mastiques é influenciado pelo esqueleto mineral, na medida em que para maiores teores em fíler, os mastiques apresentam menores valores de ângulos de fase quando comparados com o betume a elevada temperatura e baixa frequência, no canto inferior direito dos gráficos  $G^*$  vs  $\delta$ . Este comportamento é claramente evidenciado entre as suspensões P/NHL5\_20% e P/NHL5\_33%.

No entanto, na Figura 4.7, o mastique de calcário com maior teor de fíler apresenta um comportamento atípico, na medida em que assume valores de ângulo de fase superiores aos da suspensão P/RC480\_20%. Esta situação pode ser explicada pelas condições de armazenamento destas suspensões, o que pode levar a alguma perda das características.

Confirma-se que, para reduzidas temperaturas, o mastique com maior teor de fíler apresenta um aumento no valor do módulo complexo, traduzindo, mais uma vez, o efeito da presença de esqueleto mineral.

#### 4.1.2.4. Curvas mestras

A curva mestra trata-se de uma representação fundamental das propriedades reológicas dos materiais viscoelásticos, pois descreve o seu comportamento ao longo de uma gama vasta de temperaturas e de frequências. A sua construção baseou-se no Princípio de Sobreposição Tempo-Temperatura, no qual as curvas isotérmicas são deslocadas através de fatores de deslocamentos,  $a_T(T_i)$ , que podem ser obtidos manualmente ou por expressões matemáticas, até formarem uma curva única isotérmica em continuidade com a curva isotérmica de referência, que neste caso é 25°C.

Neste trabalho determinaram-se os fatores de deslocamento manualmente e os estimados a partir da expressão de *William, Landel e Ferry*. Tem-se que, para curvas isotérmicas a temperaturas mais elevadas à da referência, o deslocamento é efetuado para a esquerda, pelo facto de apresentarem rigidezes mais baixas em comparação com a curva isotérmica à temperatura de referência, anotando-se um valor negativo. A partir dos resultados obtidos verificou-se que os dados experimentais se ajustavam melhor aos fatores deslocados manualmente do que os obtidos pela equação de WLF, tendo estes sido utilizados para a construção das curvas mestras apresentadas no estudo.

Na Figura 4.8 estão representados os valores dos fatores de translação estimados para os mastiques comparando com os dos betumes. Verifica-se que os materiais apresentam valores muito próximos aos dos ligantes respetivos, independentemente do tipo e teor em fíler, observando-se um maior desvio às temperaturas intermédias. Estes resultados demonstram que os fatores de deslocamento são pouco sensíveis à adição de fíler, situação observada também no trabalho de Anderson et al. (1992) e Di Benedetto et al. (2004).

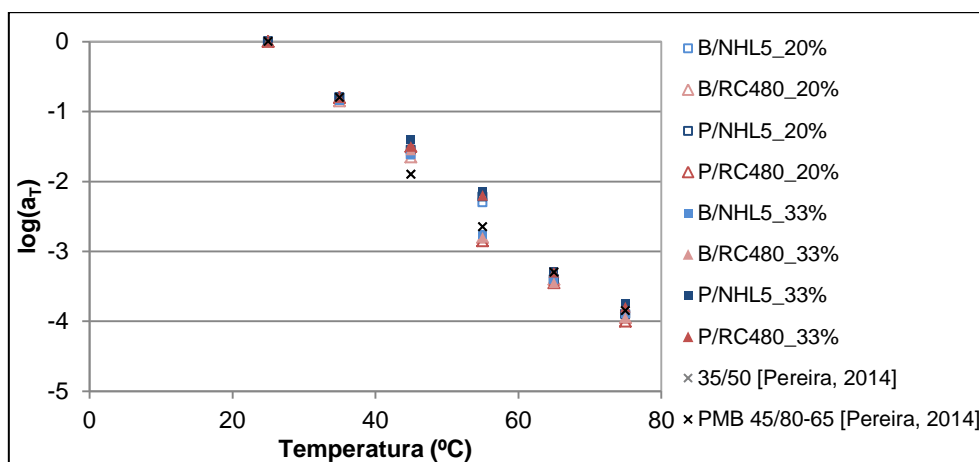


Figura 4.8 – Variação dos fatores de translação das curvas mestras dos mastiques e ligantes betuminosos, em função da temperatura

As curvas mestras dos mastiques e dos betumes foram analisadas relativamente ao tipo de ligante betuminoso, ao tipo de fíler e ao conteúdo de fíler, de modo a facilitar a interpretação do efeito de fíler no comportamento reológico do mastique betuminoso.

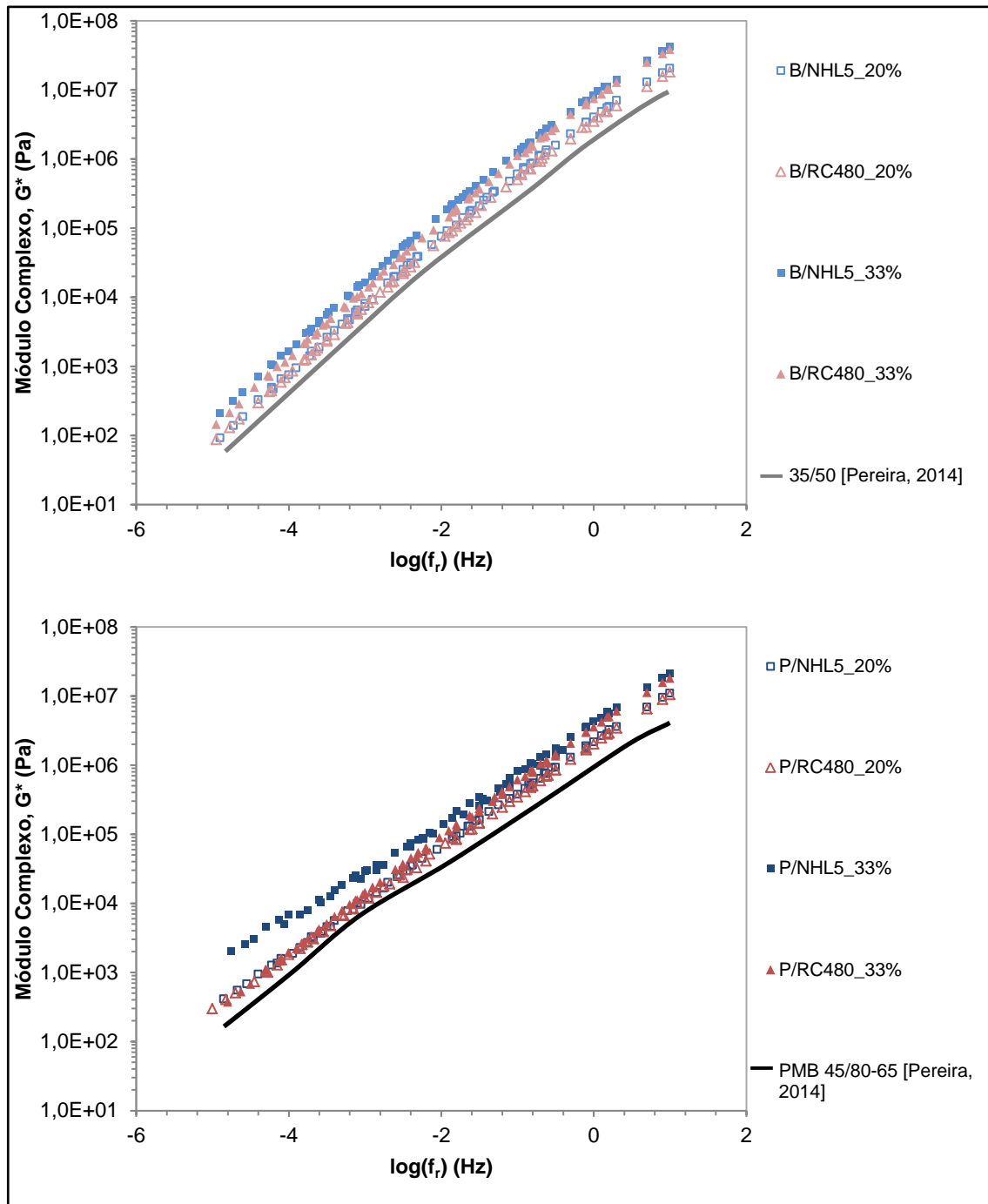


Figura 4.9 – Curvas mestras do módulo complexo em função dos betumes 35/50 e PMB 45/80-65

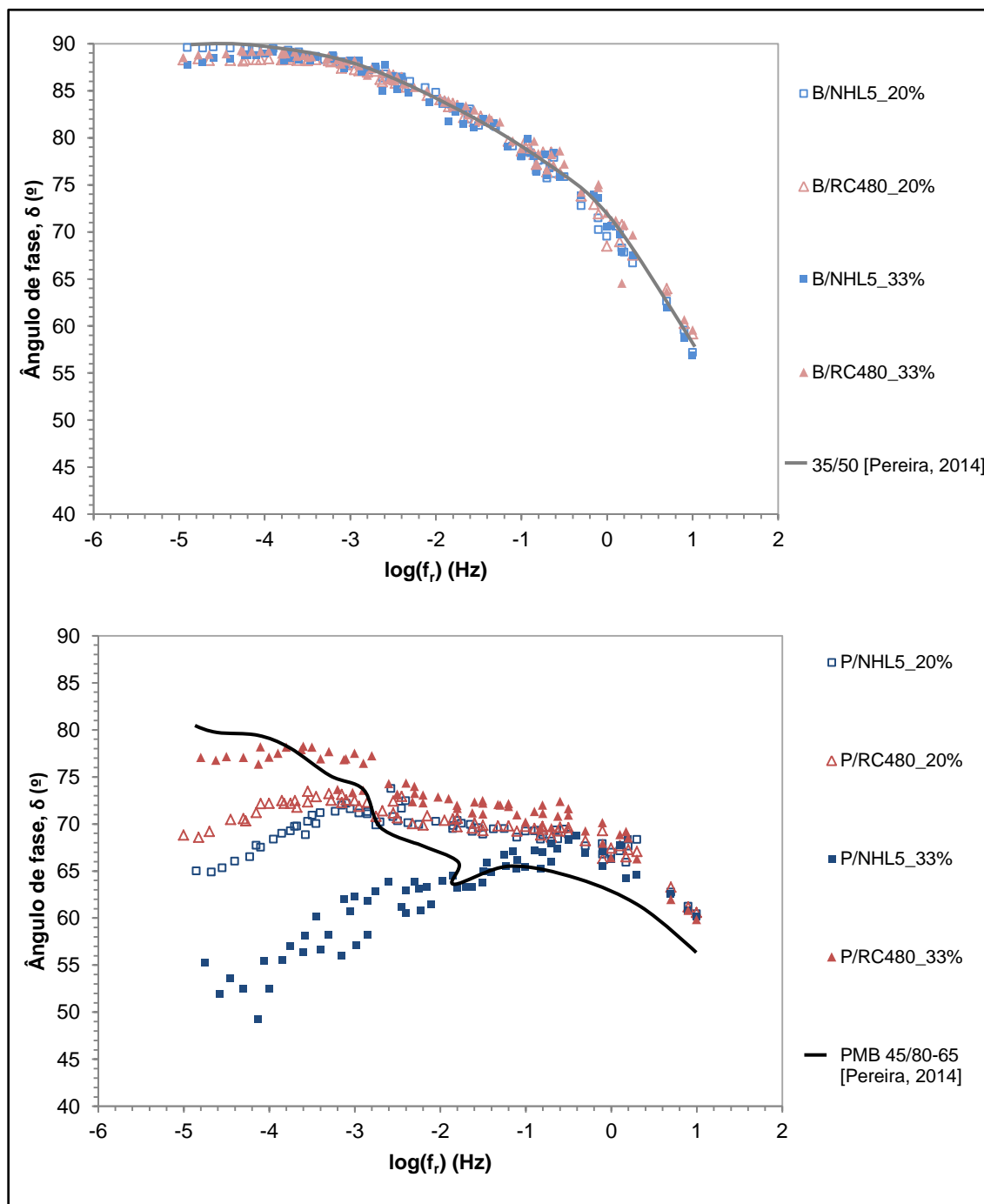


Figura 4.10 – Curvas mestras do ângulo de fase em função dos betumes 35/50 e PMB 45/80-65

- Influência no tipo de ligante betuminoso

Na Figura 4.9 verifica-se algum efeito do tipo de betume usado nos mastiques estudados, onde as curvas dos mastiques são quase paralelas às dos ligantes betuminosos, à exceção do mastique P/NHL5\_33% a elevadas temperaturas e baixas frequências, no canto inferior esquerdo. Constata-se que as curvas mestras das suspensões com calcário apresentam menor efeito do tipo de betume em relação às das suspensões com cal hidráulica, pois este fíler é considerado ativo. Observa-se também a presença de esqueleto mineral para elevadas

temperaturas e baixas frequências, traduzido pelo aumento do módulo complexo e pela diminuição do ângulo de fase.

A partir da representação das curvas mestras em função do ângulo de fase, na Figura 4.10, é mais evidente a influência do tipo de ligante betuminoso utilizado nas suspensões do que as representadas em função do módulo complexo, pois as curvas tomam comportamentos similares às das curvas dos betumes, estando estas mais afastadas entre si. O efeito do tipo de betume é mais claro para as suspensões com o fíler ativo, pois os mastiques admitem comportamentos bastantes dispare entre betumes diferentes aplicados, justificado pela interação entre as partículas sólidas elásticas e o betume. Os mastiques modificados tomam um comportamento mais elástico que os mastiques com betume puro, ou seja, apresentam valores de ângulo de fase mais reduzidos, por causa da maior interação entre os polímeros elastômeros e as partículas sólidas, sendo esta interação tanto maior quanto maior o conteúdo de fíler.

- Influência no tipo de fíler

Na Figura 4.9, o efeito de rigidez associado à adição de fíler no ligante betuminoso é observado através da translação das curvas mestras dos mastiques betuminosos, sendo maior este efeito, quanto mais afastada a curva da suspensão está da do ligante betuminoso referente. Os mastiques diluídos, com teor de fíler em volume de 20%, apresentam pouca variação no efeito de rigidez do fíler quanto ao tipo de fíler, devido à reduzida interação hidrodinâmica entre partículas, como esperado. Os resultados dos mastiques concentrados assumem pouca influência no tipo de fíler, pois as curvas estão bastante próximas entre si, verificando-se uma ligeira translação da curva da suspensão P/NHL5\_33% a elevadas temperaturas e baixas frequências, verificada no canto inferior esquerdo da Figura 4.9, justificado pela presença de esqueleto mineral e pela interação hidrodinâmica entre partículas e interação entre fíler e polímeros. No entanto, observa-se que as curvas mestras da cal hidráulica estão situadas acima das curvas mestras com calcário, ao longo do comportamento reológico, devido à diferença de atividade entre os dois tipos de fíler e à diferença de volume efetivo de fíler presente na suspensão. Tem-se que a cal hidráulica admite um maior valor de índice de vazios, resultando num maior volume efetivo de fíler, e portanto o mástico com cal hidráulica apresenta maiores valores de módulo complexo que o mástico com calcário.

Relativamente às representações observadas na Figura 4.10 confirma-se o pouco efeito do tipo de fíler nas curvas mestras dos mastiques, nomeadamente nos mastiques compostos com betume puro. Quanto às curvas dos mastiques modificadas observa-se um maior efeito do tipo de fíler do que em relação aos mastiques com betume 35/50, devido à interação entre polímeros e partículas minerais, sendo maior o efeito no caso do mástico P/NHL5\_33% em que apresenta uma curva mais afastada das restantes representações, por causa da presença do esqueleto mineral. Nesta mesma representação observa-se que os mastiques com cal hidráulica tomam valores de ângulo de fase superiores aos dos mastiques com calcário.

- Influência no conteúdo em fíler

Na Figura 4.9 observa-se o efeito do teor de fíler nas curvas mestradas dos mastiques, onde os mastiques concentrados apresentam maior rigidez do que os mastiques diluídos, demonstrado pela translação vertical no sentido ascendente das curvas mestras dos mastiques concentrados. Este facto deve-se às partículas de fíler assumirem um efeito de preenchimento com o aumento de concentração de fíler, provocado pelo aumento do volume efetivo de fíler. O aumento considerável do efeito de rigidez para mastiques concentrados indica que a interação entre partículas é mais dominante nas suspensões com teor em fíler de 33%. Contudo na mesma representação observa-se que a curva mestra do mástico P/RC480\_33% não está em conformidade com o esperado, em que a curva mestra deveria assumir resultados de módulos complexos superiores aos observados na curva mestra P/RC480\_20%, a elevadas temperaturas (no canto inferior esquerdo), devido ao aumento do conteúdo em fíler.

Através da figura 4.9 observa-se um elevado aumento do módulo de rigidez para a suspensão P/NHL5\_33% a baixas frequências, no canto inferior esquerdo, provocado pela grande interação entre as partículas finas e os polímeros, pois, para elevadas concentrações, tem-se que as partículas de fíler estão mais próximas, verificando-se valores bastante elásticos, ou seja, mais reduzidos de ângulo de fase na Figura 4.10.

Na Figura 4.10, o sistema P/NHL5\_33% apresenta claramente valores elásticos de ângulos de fase muito díspares dos valores elásticos do P/NHL5\_20%, devido à interação entre o betume modificado com polímeros e partículas elásticas de fíler e ao efeito de rigidez do fíler. Nesta figura observa-se que as curvas mestras tomam o mesmo comportamento que o betume base, independentemente do teor de fíler.

Tal como verificado na Figura 4.10, observa-se resultados incoerentes da curva da suspensão P/RC480\_33%, uma vez que esta curva assume valores de ângulo de fase superiores aos verificados pela curva mestra do mástico diluído. Esta situação pode ser explicada pela influência de incrementos de temperatura associados ao sistema de controlo de temperatura, *Peltier*, e pelo elevado período de armazenamento das amostras das duas suspensões.

Nas representações das curvas mestras do ângulo de fase, na Figura 4.10, verifica-se que os mastiques com maior teor de fíler apresentam valores do parâmetro mais baixos que os respetivos com um menor conteúdo de fíler para elevadas frequências. Esta situação decorre devido à adição de mais fíler desencadear uma resposta elástica mais elevada.

#### 4.1.3. Modelos reológicos

No presente estudo recorreu-se ao reómetro rotacional para determinar o comportamento reológico do mástico. No entanto a este aparelho estão associadas limitações, que podem interferir na precisão dos resultados medidos, principalmente quando são realizados para reduzidas temperaturas ou elevadas frequências.

Deste modo, investigadores como Nielsen (1970), Kim and Little (2004), Faheem (2009), Faheem and Bahia (2010), Hesami et al. (2012) e Yussof (2012) investigaram modelos reológicos para estimar a viscosidade relativa e o módulo complexo relativo da suspensão fíler-betume e avaliar o efeito da adição do fíler nas suspensões em alternativa à realização dos ensaios laboratoriais, os quais consomem bastante tempo e é impreterível o conhecimento da sua utilização. Estes modelos analisam a variação do comportamento reológico do mastique, devido à agregação das partículas, grau de dispersão e tamanho das partículas.

Os modelos reológicos utilizados neste estudo foram o modelo mecânico 2S2P1D de Yussof, modelo concetual de Faheem, modelo de Einstein para suspensões diluídas, modelo de Krieger-Dougherty e o modelo de Nielsen, válidos para suspensões concentradas. Nesta secção serão comparados os resultados do parâmetro reológico do módulo complexo relativo obtidos pelos modelos reológicos com os resultados obtidos experimentalmente, a fim de averiguar a sua adequabilidade aos resultados reais.

#### 4.1.3.1. Modelos micromecânicos

Os modelos utilizados para modelar os resultados de módulo complexo relativo obtido no presente trabalho foram o modelo de Einstein, modelo de Krieger-Dougherty e modelo de Kerner modificado por Nielsen (1970).

Os valores do módulo complexo relativo foram obtidos a partir das condições 0,8Hz e 65°C, tanto para os mastiques como para os betumes.

O modelo de Einstein foi o primeiro a ser ajustado, o qual depende da concentração de fíler em volume e da viscosidade intrínseca, expresso na equação (2.3), tendo sido modificado em função do módulo complexo relativo.

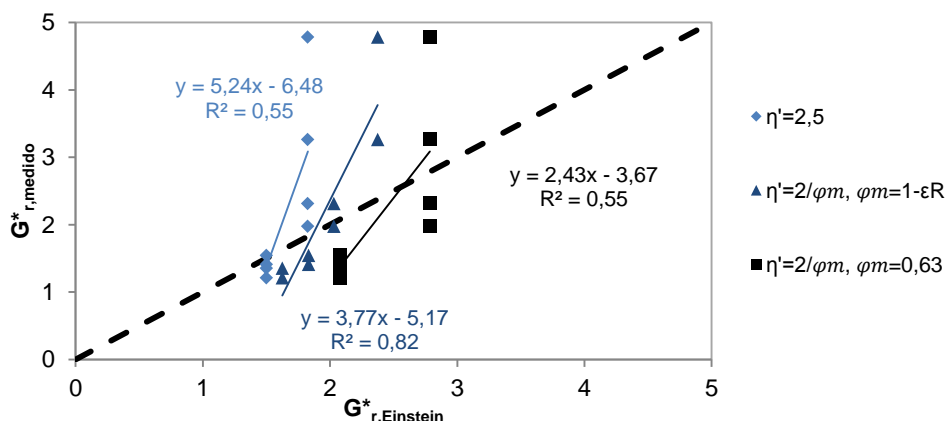


Figura 4.11 – Ajustamento entre os resultados experimentais e obtidos pelo modelo de Einstein do módulo complexo relativo

De modo a analisar o ajuste do modelo de Einstein optou-se por utilizar três valores diferentes de cálculo da viscosidade intrínseca,  $\eta'$ . Utilizou-se um valor de 2,5 (constante teórica), válido para partículas esféricas rígidas, sem interação entre si, definido por Einstein. Por outro lado, estimou-se a viscosidade intrínseca segundo definido por Lesueur and Little (1999), expresso

na equação (2.4) na secção 2.3.2., a qual depende do valor da compacidade máxima,  $\varphi_m$ . Para este último parâmetro de filler estabeleceram-se dois resultados, optando por utilizar o valor mais corrente da literatura de 63% e determinado em função do índice de vazios ( $\varphi_m = 1 - \varepsilon_R$ ). Com base na Figura 4.11 observa-se que o modelo admite um mau ajuste para as três representações, sendo que a relativa à expressão de cálculo de viscosidade intrínseca definida por Lesueur and Little (1999) apresenta um melhor ajuste aos resultados experimentados, uma vez que considera o índice de vazios de Rigden,  $\varepsilon_R$ , para estimar o valor da compacidade máxima,  $\varphi_m$ , tomando um valor de ajuste  $R^2=0,82$ . O mau ajuste do modelo de Einstein é devido à sua insensibilidade às diferentes caraterísticas do filler e do betume que compõe o mastique betuminoso.

Verifica-se que para maiores concentrações de filler, obtêm-se maiores resultados de módulo complexo relativo, como observado nos resultados obtidos anteriormente. No entanto, sabe-se que este modelo é válido para mastiques diluídos. Assim recorreu-se ao modelo de Krieger-Dougherty e ao modelo de Nielsen que são válidos para suspensões concentradas.

A modelação do modelo de Krieger-Dougherty definida pela equação (2.5) foi obtida com base nos mesmos valores de compacidade máxima,  $\varphi_m$ , usados para o modelo de Einstein.

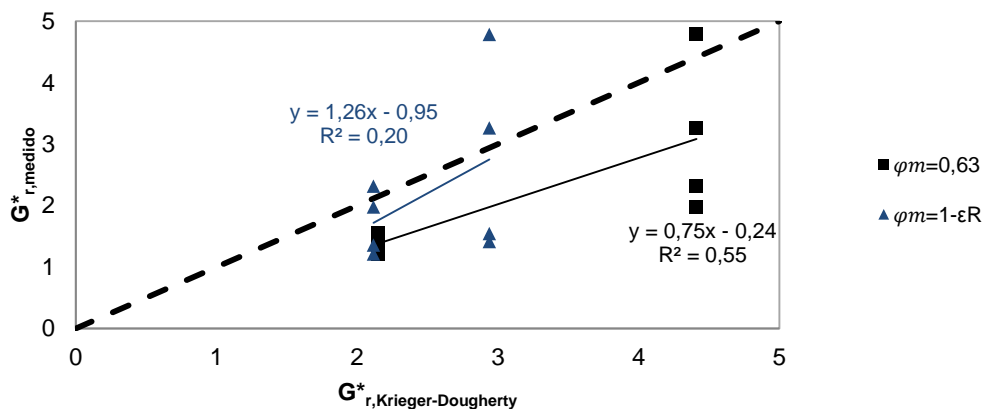


Figura 4.12 – Ajustamento entre os resultados experimentais e obtidos pelo modelo de Krieger-Dougherty do módulo complexo relativo

Na Figura 4.12 obtiveram-se resultados poucos realísticos do modelo de Krieger-Dougherty, pois a sua modelação conduz a um valor de ajustamento relativamente baixo, quando se tem em consideração o parâmetro de índice de vazios. Assumindo-se, por isso, que este modelo micromecânico toma um péssimo ajuste aos resultados medidos.

Por fim, recorreu-se ao modelo de Kerner modificado por Nielsen (1970), expresso na equação (2.7), o qual considera os dois parâmetros reológicos, a compacidade máxima e o coeficiente generalizado de Einstein,  $K_E$ . Para as constantes A e B do modelo assumiram-se valores respetivos de 1,5 e 1, pois considerou-se um valor de  $K_E$  igual a 2,5, como definido pela literatura.

Com base na Figura 4.13 verifica-se que os resultados do módulo complexo dos mastiques diluídos e concentrados não assumem valores constantes como observado nos outros modelos, pois este modelo considera a contribuição físico-química de rigidez do filler através do parâmetro,  $K_E$ , e o efeito de preenchimento de filler na suspensão através da compacidade



máxima. Observa-se que o modelo de Nielsen se ajusta melhor aos resultados reais, quando comparado com os modelos reológicos anteriores, no entanto admite um mau ajuste aos resultados, pois não considera o tipo de betume utilizado.

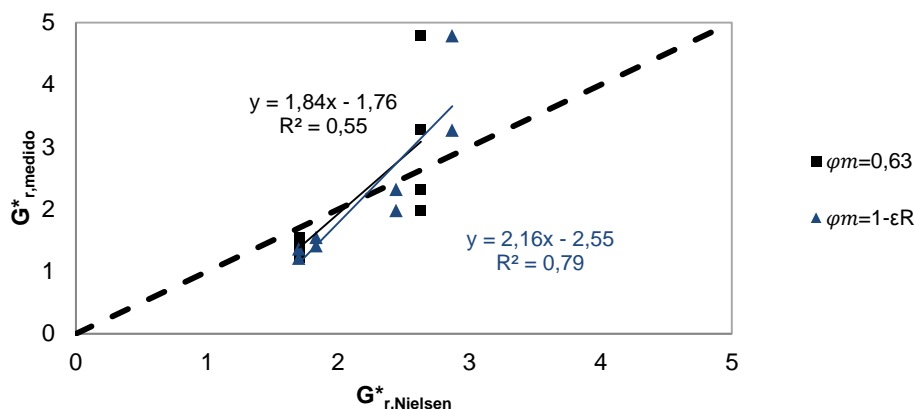


Figura 4.13 – Ajustamento entre os resultados experimentais e obtidos pelo modelo de Nielsen do módulo complexo relativo

#### 4.1.3.2. Modelo concetual de Faheem

O modelo concetual de Faheem permitiu definir as regiões diluída e concentrada, interpretar o efeito do filler no mastique e estimar a interação filler-betume e entre partículas.

O cálculo do modelo de Faheem foi efetuado com base na expressão (2.16) e nos valores das propriedades físicas e químicas dos fíleres estudados no Quadro 3.3, estando apresentados os resultados das constantes,  $G_1$  e  $G_2$ , e dos parâmetros reológicos do modelo,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $\varphi_c$  no Quadro 4.2:

Quadro 4.2 – Valores das constantes, dos parâmetros reológicos e do módulo complexo relativo do modelo de Faheem

Mastique	$G_m^*$ (kPa)	$G_b^*$ (kPa)	$G_1$ (Pa)	$G_2$ (Pa)	$a_1$	$a_2$	$\varphi_c$	$G_{r,Faheem}^*$	$G_r^*$
B/NHL5_20%	2,64	1,71	4,39	4,67	0,05	0,84	51,79	2,86	1,54
B/RC480_20%	2,32	1,71	4,39	4,67	0,08	3,03	44,56	2,42	1,36
P/NHL5_20%	4,56	3,23	3,33	0,75	0,05	0,84	51,79	1,80	1,41
P/RC480_20%	3,92	3,23	3,33	0,75	0,08	3,03	44,56	1,29	1,21
B/NHL5_33%	5,58	1,71	4,39	4,67	0,05	0,84	51,79	3,55	3,27
B/RC480_33%	3,95	1,71	4,39	4,67	0,08	3,03	44,56	4,54	2,31
P/NHL5_33%	15,48	3,23	3,33	0,75	0,05	0,84	51,79	2,43	4,78
P/RC480_33%	6,40	3,23	3,33	0,75	0,08	3,03	44,56	2,37	1,98

No cálculo da constante  $G_1$  assumiu-se um valor de conteúdo de asfalto de 17,4% para o betume puro de 35/50, indicado no trabalho de Guimarães (2012). Os resultados do módulo complexo dos mastiques e dos ligantes betuminosos foram obtidos às condições de 0,8Hz a 65°C, condições similares às prestadas no estudo de Faheem.

Por forma a analisar melhor a comparação entre os resultados experimentais e os do modelo de Faheem do módulo complexo relativo, optou-se por representá-los na Figura 4.14. Nesta figura observa-se um mau ajustamento, justificado pelo reduzido valor de  $R^2$ , devido aos resultados bastante díspares das suspensões P/NHL5\_33% e P/RC480\_33%. O mau

ajustamento do modelo em relação aos dados experimentais é devido ao facto deste modelo ser indicado para o ajuste dos materiais estudados na investigação de Faheem (2008), assim estes materiais assumem propriedades físicas dos fíleres diferentes das dos fíleres estudados no presente trabalho, resultando em parâmetros e constantes obtidos diferentes. Analisando a Figura 4.14 pode-se concluir que este modelo é adequado para prever resultados de módulo complexo relativo para suspensões diluídas, pois tomam valores próximos aos obtidos pelos ensaios experimentais.

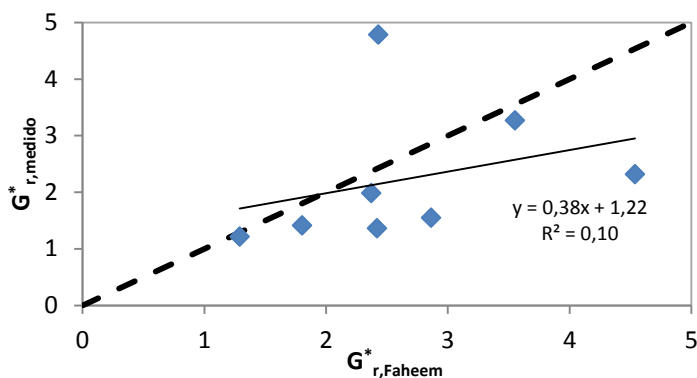


Figura 4.14 – Ajustamento entre os resultados experimentais e obtidos pelo modelo de Faheem do módulo complexo relativo

Na Figura 4.15 estão representados os resultados do módulo complexo relativo,  $G_r^*$ , em função do volume efetivo de fíler, para as mesmas condições de ensaio utilizadas no Quadro 4.2. Este tipo de representação está apresentado no capítulo 2 do estudo referente aos modelos reológicos das suspensões e permite descrever a evolução da rigidez do mástico em termos de influência do fíler de acordo com o modelo concetual de Faheem. Segundo Faheem, esta curva tem como principal objetivo definir a região diluída e a região concentrada. Conforme o modelo de Faheem verifica-se, pela Figura 4.15, que os mastiques de menor teor em fíler assumem uma taxa de rigidez inicial com tendência linear, e portanto estão situados na região diluída. A partir das suspensões de cal hidráulica diluídas denota-se uma evolução da curva de rigidez com uma tendência não linear por parte dos mastiques com maior teor em fíler, situando-se, assim, na região concentrada. Deste modo se verifica uma concordância com o estipulado anteriormente, em que se assumiu os mastiques com 20% de fíler em volume e com 33% de fíler em volume serem mastiques diluídos e concentrados, respetivamente.

Analisando os resultados do módulo de rigidez relativo dos mastiques estudados, na Figura 4.15, observa-se um aumento de rácio de rigidez com o aumento do volume efetivo de fíler, o que demonstra uma grande influência do conteúdo em fíler na rigidez do mástico. O elevado aumento do rácio de rigidez verificado no mastiques concentrados é provocado pela contribuição dos fíleres, em que o fíler vai ocupando um grande volume de betume, aumentando o volume de betume fixo. Neste caso, existe interação fíler-fíler, havendo assim um efeito na concentração de fíler no módulo complexo. Observa-se, também, que os mastiques de cal hidráulica admitem valores de rigidez mais elevados que os de calcário, devido à atividade inerente da cal hidráulica.

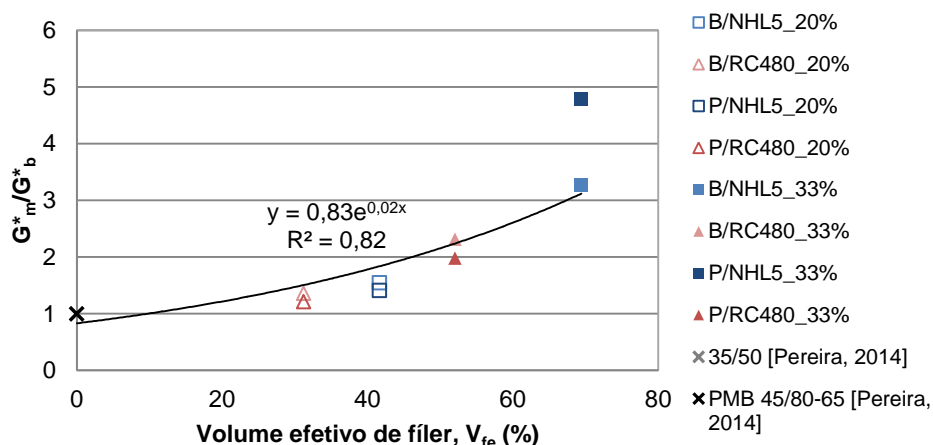


Figura 4.15 – Módulo de corte complexo relativo em função do volume efetivo de fíler ( $V_{fe}$ )

#### 4.1.3.3. Modelo 2S2P1D

Posto isto, primeiramente apresentam-se os resultados obtidos pelo modelo reológico mecânico 2S2P1D investigado por Yussuf (2012). Optou-se por recorrer a este modelo reológico para modelar as propriedades viscoelásticas lineares do mastique, visto ser recomendado e válido para ser utilizado em mastiques betuminosos pela literatura.

No Quadro 4.3 estão comparados os valores das constantes que determinam os resultados dos parâmetros reológicos.

Quadro 4.3 – Valores das constantes do modelo 2S2P1D usados na modelação das curvas mestras

Material	$G_0$ (Pa)	$G_\infty$ (Pa)	$k$	$h$	$\beta$	$\lambda$	$\alpha$
35/50 (Pereira, 2014)	0	1,00E+09	0,20	0,61	38	1,80E-05	3,5
PMB 45/80-65 (Pereira, 2014)	0	1,00E+09	0,21	0,68	300	6,00E-06	5,5
B/NHL5_20%	10	3,00E+09	0,20	0,61	38	9,00E-06	3,5
B/RC480_20%	10	3,50E+09	0,20	0,61	38	8,40E-06	3,5
P/NHL5_20%	40	6,00E+09	0,21	0,68	300	2,00E-06	5,5
P/RC480_20%	40	6,00E+09	0,21	0,68	300	1,70E-06	5,5
B/NHL5_33%	30	9,00E+09	0,20	0,61	38	9,50E-06	3,5
B/RC480_33%	25	8,00E+09	0,20	0,61	38	7,00E-06	3,5
P/NHL5_33%	100	9,20E+09	0,21	0,68	300	3,50E-06	5,5
P/RC480_33%	80	9,00E+09	0,21	0,68	300	1,80E-06	5,5

Verifica-se que adição do fíler no betume provoca o aumento do valor das constantes  $G_0$  e  $G_\infty$ , observando-se um maior aumento nos mastiques com maior teor de fíler em volume, devido ao efeito de rigidez inerente à inclusão de partículas finas sólidas elástica. Estas constantes foram ajustadas manualmente até se obter um bom ajuste com os resultados experimentais. As restantes constantes, à exceção do parâmetro  $\lambda$ , tomaram os mesmos valores que os adotados nos ligantes betuminosos respetivos, como indicado por Anderson et al. (1992) e Delaporte et al. (2009).

As constantes do modelo 2S2P1D permitiram uma boa modelação para os resultados do módulo complexo. Contudo observou-se alguma discrepância na modelação com os valores de

ângulo de fase dos mastiques modificados, que poderá ser explicada pelo facto deste modelo não ter em consideração com a interação entre o fíler e o polímero. Esta observação foi também verificada para os ligantes betuminosos em Pereira (2014).

#### 4.1.4. Efeito da rigidez do fíler mineral no sistema fíler-betume

Com base nos resultados obtidos pelos ensaios com varrimento de frequência verifica-se que a adição de fíler no ligante betuminoso contribui para o aumento da rigidez. Posto isto, nesta secção pretendeu-se analisar o efeito da rigidez do fíler, com base nos resultados dos módulos complexos relativos,  $G_r^*$ , que correspondem ao quociente entre o módulo complexo da suspensão com o módulo complexo da matriz (betume).

No Quadro 4.4 são comparadas as medições do módulo complexo,  $G^*$ , com os valores de módulo complexo relativo,  $G_r^*$ , dos betumes e mastiques estudados. Estes resultados foram retirados dos ensaios oscilatórios de varrimentos de frequência a 25°C, 55°C e 75°C sob uma frequência de carga de 10Hz.

Quadro 4.4 – Valores de módulo complexo e rácio de rigidez dos mastiques e ligantes para 25°C, 55°C e 75°C, a 10Hz

Materiais	$G^* (Pa)$ ( $G_r^*$ )		
	25°C	55°C	75°C
B/NHL5_20%	2,06E+07 (2,09)	3,41E+05 (4,25)	9,21E+03 (1,54)
B/RC480_20%	1,82E+07 (1,85)	1,06E+05 (1,32)	8,35E+03 (1,40)
P/NHL5_20%	1,10E+07 (2,48)	1,02E+05 (1,50)	1,41E+03 (1,50)
P/RC480_20%	1,04E+07 (2,36)	8,78E+04 (1,29)	1,19E+04 (1,26)
B/NHL5_33%	4,14E+07 (4,20)	2,57E+05 (3,21)	2,01E+04 (3,36)
B/RC480_33%	3,85E+07 (3,91)	1,79E+05 (2,24)	1,41E+04 (2,37)
P/NHL5_33%	2,10E+07 (4,75)	5,35E+05 (7,87)	3,59E+04 (3,80)
P/RC480_33%	1,80E+07 (4,09)	4,14E+05 (6,09)	2,01E+04 (2,14)
35/50 (Pereira, 2014)	9,85E+06 (1,00)	8,02E+04 (1,00)	5,97E+03 (1,00)
PMB 45/80-65 (Pereira, 2014)	4,41E+06 (1,00)	6,79E+04 (1,00)	9,43E+03 (1,00)

No Quadro 4.4 é possível verificar-se a influência do tipo e concentração de fíler usados na composição dos mastiques betuminosos estudados. Verifica-se que mastiques formulados à mesma concentração volúmica de fíler apresentam resultados de rácio de rigidez diferentes, devido à compacidade. Observa-se o aumento do módulo complexo, à medida que a concentração em fíler aumenta, e, portanto, os mastiques concentrados admitem valores de rácio de rigidez superiores aos dos mastiques diluídos. Constatam-se um ligeiro decréscimo do

módulo complexo do mastique B/NHL5\_33% a 55°C quando comparado com o respetivo mastique a um teor mais baixo de fíler, o que releva ser um valor duvidoso. Esta situação poderá ser justificada provavelmente pelas condições de armazenamento do material, nomeadamente no elevado período de armazenamento, e pelo sistema de controlo de temperatura usado menos adequado. Tem-se que os mastiques com cal hidráulica assumem valores de rácio superiores aos do calcário, devido ao facto de possuírem uma maior percentagem de volume influenciado pelas partículas de fíler.

## **4.2. Resultados dos ensaios de fadiga dos mastiques betuminosos**

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos ensaios da avaliação da resistência à fadiga e da capacidade auto-regenadora dos mastiques betuminosos, executados no reómetro rotacional sob deformação controlada. Nos ensaios de avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga foram executados ensaios a deformação controlada e ensaios a incremento de deformação (LAS) que avaliam a acumulação de dano nas amostras betuminosas.

Em todos os ensaios de fadiga efetuaram-se a média de 3 medidas, de modo a assegurar a repetibilidade de ensaios. Porém, na determinação da média das 3 medidas teve-se alguma dificuldade em se obter um coeficiente de variação razoável assumindo um limite máximo de 20%. Por vezes foi necessário proceder a várias repetições das medições, tendo atingido mais de 10 repetições, de modo a se obter uma boa média de 3 medidas segundo a avaliação de resistência de fadiga através da abordagem tradicional e da abordagem de energia dissipada. Esta grande variação de resultados medidos é fundamentada principalmente pelas condições e períodos de armazenamento da amostra.

Apesar da temperatura de ensaio utilizada, 15°C, nos ensaios de fadiga a deformação controlada dos ligantes betuminosos, investigado em Pereira (2014) ser diferente da utilizada nos ensaios de fadiga para os mastiques betuminosos, com valor de 25°C, optou-se por incluir a sua representação nos gráficos apresentados de seguida, de forma a se relacionar as curvaturas dos gráficos obtidos e a posição relativa entre os diferentes betumes. No entanto, a análise dos resultados dos ensaios de fadiga incidiu nos resultados dos mastiques betuminosos, que permitiu discutir o efeito da adição de fíler no comportamento do betume, com base na influência do tipo de ligante e de fíler e do conteúdo em fíler empregues nos mastiques betuminosos.

### **4.2.1. Ensaios de fadiga a deformação controlada**

Este tipo de ensaio foi realizado com carregamento oscilatório contínuo e descontínuo, com a introdução de períodos de repouso.

Os ensaios de fadiga a deformação constante foram realizados a três níveis de deformação distintos, 1,2%, 1,6% e 2%, por forma a possibilitar a definição da lei de fadiga conforme a equação (2.24) a 25°C.

Os resultados dos ensaios de fadiga a deformação controlada foram avaliados, segundo a abordagem tradicional e a abordagem de energia dissipada.

#### 4.2.1.1. Avaliação da resistência à fadiga pela abordagem tradicional

Neste critério de avaliação da resistência à fadiga, a vida de fadiga é atingida aquando da redução de 50% do módulo complexo inicial do material.

No Quadro 4.5 estão representadas as médias dos resultados obtidos de módulo complexo e vida de fadiga para os diferentes sistemas filer-betume, em função da deformação aplicada:

Quadro 4.5 – Resultados de vida de fadiga e do módulo complexo dos mastiques a deformação contínua, segundo a abordagem tradicional

Materiais	Y=1,2%		Y=1,6%		Y=2%	
	N <sub>f,50</sub>	G* <sub>50%</sub> (Pa)	N <sub>f,50</sub>	G* <sub>50%</sub> (Pa)	N <sub>f,50</sub>	G* <sub>50%</sub> (Pa)
B/NHL5_20%	15367	6,71E+06	8333	6,87E+06	5033	6,88E+06
B/RC480_20%	15767	6,19E+06	9533	5,61E+06	6233	5,78E+06
B/NHL5_33%	8700	1,84E+07	5000	1,71E+07	3967	1,46E+07
B/RC480_33%	12533	9,68E+06	7233	8,79E+06	4567	7,96E+06
P/NHL5_20%	15800	7,93E+06	8333	6,95E+06	6067	7,26E+06
P/RC480_20%	-	-	66100	3,53E+06	36133	3,81E+06
P/NHL5_33%	29367	1,01E+07	18233	9,35E+06	11767	9,05E+06
P/RC480_33%	65900	7,43E+06	44767	5,94E+06	27767	4,61E+06

Com base no Quadro 4.5 tem-se destacado que o sistema P/RC480\_20% não atingiu a vida de fadiga para as condições de ensaio transpostas, uma vez que não se alcançou o número de ciclos até se atingir a fadiga para o período de ensaio estipulado de 3h que corresponde a 100.000 ciclos.

Nos resultados obtidos verifica-se que a adição de filer conduziu a menores desempenhos do comportamento quanto ao fendilhamento por fadiga, traduzidos pela redução da vida de fadiga com o aumento do teor em filer, sendo mais perceptível nos mastiques com betume puro. No entanto observa-se que os resultados de vida de fadiga do mástico P/NHL5\_33% são superiores aos do mástico P/NHL5\_20%, sendo inesperados, pois não estão de acordo com os resultados obtidos com as suspensões de betume puro nem com o estipulado pela literatura.

Com o aumento da deformação aplicada, verifica-se um decréscimo esperado no número de ciclos até atingir falha,  $N_{f,50}$ , o que significa que, para a deformação de 2%, os materiais são mais sensíveis ao fendilhamento por fadiga.

A Figura 4.16 apresenta graficamente os resultados experimentais do nº de ciclos até à rotura versus a deformação aplicada para os vários mastiques e as leis de fadiga obtidas. Para uma

melhor análise dos resultados das expressões da lei de fadiga optou-se por representar as expressões com moldura para as suspensões com teor em fíler de 33% em volume e as restantes expressões da lei de fadiga relativas às suspensões mais diluídas. Estas representações serão discutidas de seguida, onde se analisa os resultados obtidos quanto à influência da adição de fíler no ligante betuminoso.

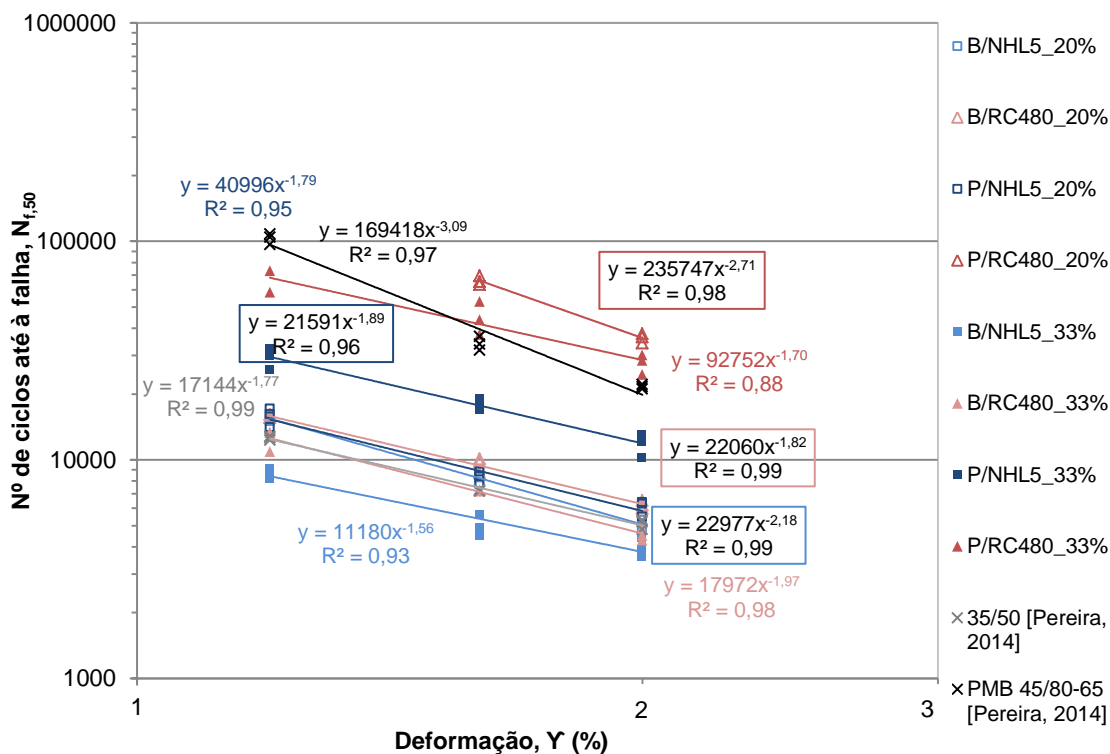


Figura 4.16 – Leis de fadiga com base na abordagem tradicional dos mastiques betuminosos estudados dos ensaios de fadiga descontínuos

No Quadro 4.6 estão comparados os resultados da vida de fadiga dos mastiques betuminosos a deformação contínua e descontínua com a introdução de períodos de repouso.

Quadro 4.6 – Valores de vida de fadiga,  $N_{f,50}$ , dos ensaios de fadiga descontínuos, com base na abordagem tradicional dos mastiques betuminosos estudados

Materiais	$\gamma=1,2\%$				$\gamma=2\%$			
	0s	4s	8s	16s	0s	4s	8s	16s
B/NHL5_20%	15367	15900	20533	17367	5033	4467	4333	4567
B/NHL5_33%	8700	9500	6767	13033	3967	-	-	-
B/RC480_20%	15767	17333	23900	22667	6233	5200	5900	5500
B/RC480_33%	12533	13267	13533	16667	4567	2700	2367	1500
P/NHL5_20%	15800	16567	18133	-	6067	4833	4700	-
P/NHL5_33%	29367	57467	65900	-	11767	11700	14100	-
P/RC480_20%	-	-	-	-	36133	37667	53533	-
P/RC480_33%	65900	-	-	-	27767	30950	26750	-

Os resultados dos ensaios de avaliação da capacidade de auto-regeneração das suspensões P/RC480\_20% e B/NHL5\_33% não estão apresentados no Quadro 4.6 por razões distintas. Tal como explicado anteriormente no Quadro 4.5, os valores de vida de fadiga de P/RC480\_20%

não estão definidos no Quadro 4.6, pelo facto de não se ter atingido a vida de fadiga para as condições de ensaio estipuladas utilizando os três períodos de repouso. Relativamente aos resultados  $N_{f,50}$  da suspensão B/NHL5\_33%, estes não estão apresentados, pois observou-se uma variação brusca do módulo complexo nos primeiros ciclos do ensaio, fundamentado pelas condições de ensaio utilizadas.

Comparando os resultados de fadiga descontínuos a deformações distintas verifica-se que quanto maior a deformação utilizada no ensaio, pior é o desempenho à fadiga dos mastiques e ligantes betuminosos. Observa-se um aumento do desempenho de fadiga com o acréscimo do tempo de repouso, traduzido pelo incremento da vida de fadiga.

- Influência no tipo de ligante betuminoso

Relativamente à influência no tipo de ligante betuminoso, na Figura 4.16 verifica-se que as retas que definem a lei de fadiga das suspensões com betume 35/50 tomam um declive bastante similar ao da reta definida para o betume puro. Denota-se alguma influência no tipo de betume usado, pois os resultados de vida de fadiga dos mastiques encontram-se próximos aos resultados dos ligantes betuminosos, à exceção do mástico P/NHL5\_20% o qual toma resultados de vida de fadiga bastante inferiores aos do betume modificado e aos dos restantes mastiques modificados. Observa-se que as suspensões modificadas apresentam valores de vida de fadiga sempre superiores às dos mastiques com betume puro, indicando uma maior resistência à fadiga, conferido pela interação entre polímeros e conteúdo asfáltico do ligante betuminoso e pela interação entre partículas minerais sólidas e conteúdo betuminoso.

Quanto aos resultados dos ensaios de fadiga descontínuos, apresentados pelo Quadro 4.6, está evidenciado claramente o efeito do tipo de betume na regeneração dos mastiques concentrados com fíler cal hidráulica e dos mastiques com calcário, onde os mastiques modificados apresentam um melhor desempenho à fadiga do que os mastiques com betume puro.

- Influência no tipo de fíler

A partir da Figura 4.16 observa-se alguma influência no tipo de fíler, onde os mastiques com calcário assumem maiores valores de vida de fadiga do que os mastiques com cal hidráulica, relacionando as mesmas condições de teor em fíler e de tipo de betume, pois as partículas de fíler de calcário são mais finas que as de cal hidráulica e as suspensões com calcário tomarem volumes de betume livre superiores aos das suspensões com cal hidráulica. Esta influência é mais evidenciada nos mastiques concentrados, uma vez que as representações das leis de fadiga estão afastadas entre si.

É observada alguma interação fíler-polímero nos mastiques com cal hidráulica, sendo fíler ativo, devido ao afastamento em relação à reta de lei de fadiga do betume modificado.



Constata-se no Quadro 4.6, a influência do tipo de fíler na capacidade de auto-regeneração dos mastiques, sendo mais evidente nos mastiques modificados, devida à adesão interfacial entre as partículas de fíler e os polímeros, contribuindo para a resistência da interface. E como observado nos resultados obtidos pelos ensaios de fadiga contínuos, as suspensões de calcário, RC480, assumem melhor desempenho à fadiga que as suspensões de NHL5.

- Influência no conteúdo em fíler

Quanto aos resultados dos ensaios de fadiga a deformação constante que permitem relacionar a influência no conteúdo de fíler, ilustrados na Figura 4.16, observa-se uma grande diferença dos resultados de vida de fadiga entre os mastiques diluídos e os mastiques concentrados e, assim, uma grande influência no teor em fíler. O efeito da adição de fíler produz uma redução da resistência à fadiga, devido ao efeito de rigidez do fíler. O mástico P/NHL5\_20% demonstra um resultado de  $N_{f,50}$  bastante reduzido, pois o seu rácio de rigidez é superior aos restantes mastiques, verificado na secção 4.1.4.

Segundo a literatura, a adição de fíler contribui para uma redução da vida de fadiga, no entanto tal não se verifica para a suspensão P/NHL5\_33%, na Figura 4.16. Assim, os resultados de vida de fadiga deste mástico podem ser assumidos como desadequados, os quais podem ter sido influenciados pelo longo período de armazenamento dos provetes de ensaio, que conduziu à perda das características do ligante.

Assim sendo, o mástico diluído modificado é a suspensão que admite o melhor comportamento à fadiga em relação às restantes suspensões, devido à interação entre fíler e polímero.

A partir do Quadro 4.6 observa-se uma grande influência do teor de fíler na capacidade de auto-regeneração dos mastiques, onde os mastiques diluídos apresentam maior desempenho à fadiga que os concentrados, tal como esperado. Como observado anteriormente, a suspensão P/NHL5\_33% admite valores de vida de fadiga superiores aos da suspensão P/NHL5\_20%, o que não vai de acordo com a literatura, no entanto está em concordância com os resultados obtidos pelo ensaio de fadiga a deformação contínua.

#### 4.2.1.2. Avaliação da resistência à fadiga pela abordagem da energia dissipada

Na avaliação da resistência à fadiga através do critério de avaliação da energia dissipada estimou-se primeiramente o valor da energia dissipada (DE) a partir da equação (2.25). Em seguida apresentam-se os resultados do valor de patamar (PV), que correspondem aos valores de RDEC à redução de 50% do módulo complexo, a partir da expressão de ajustamento das curvas de energia dissipada em função do número de ciclos de carregamento em (2.29), na Figura 4.17 dos ensaios de fadiga a deformação contínua e na Figura 4.18 dos ensaios de fadiga a deformação descontínua.

A Figura 4.17 consta os resultados dos valores de PV e de  $N_{f,50}$  para as três deformações aplicadas em cada ensaio de fadiga contínuo a 25°C para cada amostra de mástico betuminoso. Enquanto a Figura 4.18 consta dos resultados de fadiga descontínuos à deformação de 1,2% e de 2% de todos os mastiques ensaiados e permite comparar com os resultados de fadiga contínua através da expressão de ajustamento dos dados experimentais.

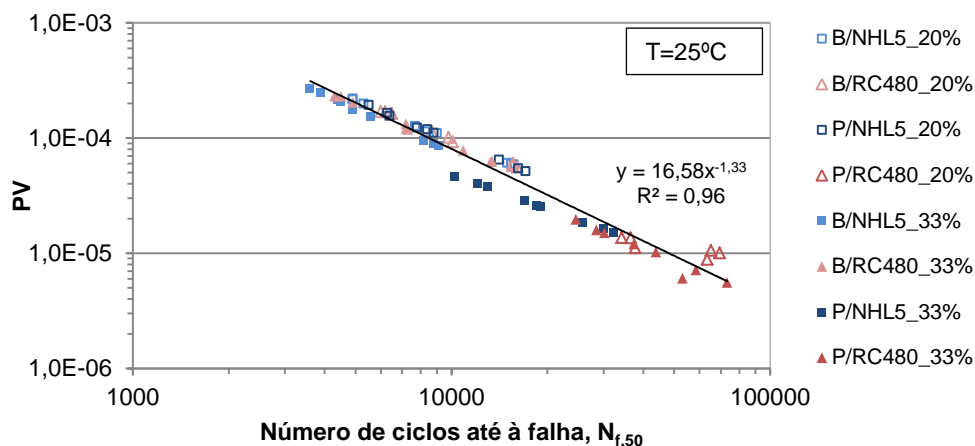


Figura 4.17 – Relação PV e  $N_{f,50}$  com todos os materiais estudados dos resultados obtidos dos ensaios de fadiga contínuo

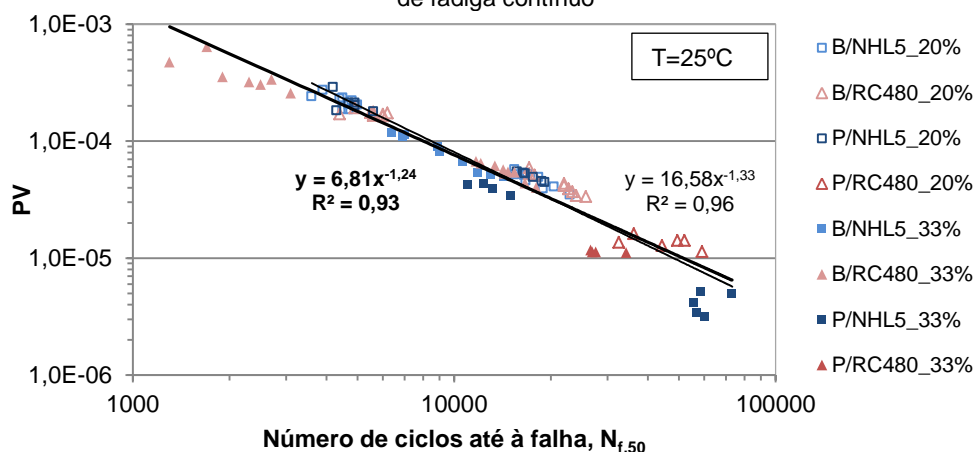


Figura 4.18 - Relação PV e  $N_{f,50}$  com todos os materiais estudados dos resultados obtidos dos ensaios de fadiga descontínuo e comparação com os resultados dos ensaios de fadiga contínuo

Observando-se as Figuras 4.17 e 4.18 conclui-se que é possível estabelecer-se uma relação única entre PV e  $N_{f,50}$ , independentemente do tipo de ligante betuminoso, do tipo de fíler e do conteúdo de fíler, respetivamente, tanto para os ensaios contínuos como para os ensaios de avaliação da capacidade de auto-regeneração dos sistemas fíler-betume. Esta conclusão vai de acordo com o discutido por Shen et al. (2010), e é justificado devido ao facto do ajustamento dos resultados ser bastante aproximado, tomando valor de  $R^2$  elevados, superiores a 0,90, onde os resultados dos ensaios de fadiga contínuo admitem um melhor ajuste.

De modo a avaliar-se melhor a capacidade de auto-regeneração dos mastiques optou-se por representar os valores de patamar em função dos períodos de repouso dos ensaios de fadiga descontínuos a 1,2% de deformação, apresentados na Figura 4.19, pois a esta deformação as variações de resultados menos díspares às verificadas para uma maior deformação.

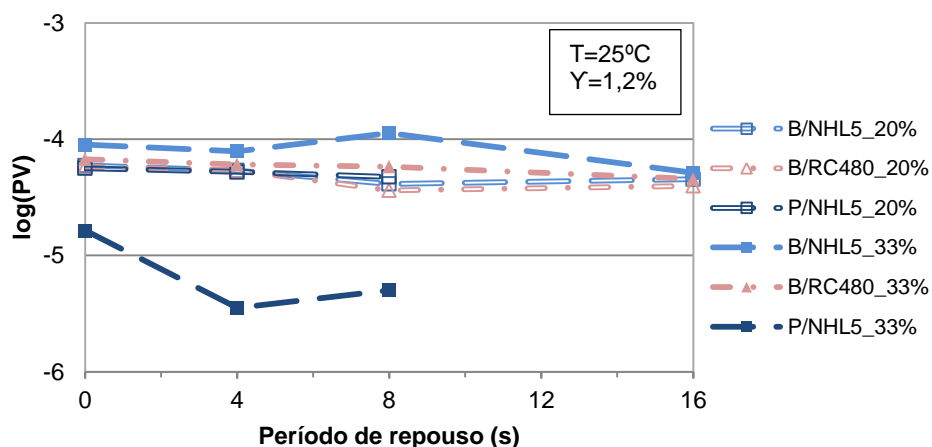


Figura 4.19 – Relação entre log(PV) e períodos de repouso dos mastiques betuminosos

A partir da Figura 4.19 observa-se que estão representados os valores de todos os mastiques estudados à exceção das suspensões P/RC480\_20% e P/RC480\_33%, uma vez que nestas suspensões não se atingiu a vida de fadiga para o período de ensaio estabelecido, ou seja, excedeu o número de ciclos até à falha estipulado de 100.000.

No Quadro 4.7 estão apresentados os valores do número de ciclos até à falha e os valores de patamar para os diferentes períodos de repouso, de modo a avaliar a capacidade de auto-regeneração das suspensões.

Quadro 4.7 – Valores de  $N_{f,50}$  e PV para os diferentes períodos de repouso usados nos ensaios de fadiga descontínuos

1,20%	4s		8s		16s	
Mastiques	$N_{f,50}$	PV	$N_{f,50}$	PV	$N_{f,50}$	PV
B/NHL5_20%	15900	5,38E-05	20533	4,17E-05	17367	4,56E-05
B/NHL5_33%	9500	7,90E-05	6767	1,13E-04	13033	5,16E-05
B/RC480_20%	17333	5,42E-05	23900	3,65E-05	22667	3,98E-05
B/RC480_33%	13267	6,11E-05	13533	5,84E-05	16667	4,59E-05
P/NHL5_20%	16567	5,25E-05	18133	4,76E-05		
P/NHL5_33%	57467	3,58E-06	65900	5,03E-06		
P/RC480_20%	-	-	-	-		
P/RC480_33%	-	-	-	-		

A partir do Quadro 4.7 observa-se que não estão apresentados valores dos mastiques modificados com calcário, RC480, pois nessas medidas de ensaio não se atingiu a vida de fadiga.

De seguida estão apresentados os resultados dos ensaios de fadiga contínuos a 1,2% de deformação em forma de curvas que representam a evolução da energia dissipada em função do número de ciclos, nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

- Influência no tipo de ligante betuminoso

Na Figura 4.20 está apresentada a evolução da energia dissipada (DE – *Dissipated Energy*) em função do número de ciclos de carga, quanto à influência do tipo de ligante betuminoso.

Verifica-se uma diminuição do parâmetro ao longo do decorrer do ensaio, em todas as amostras. Observa-se também que quanto maior o valor de DE inicial, menor é o valor do número de ciclos até atingir a falha, o que significa que o material apresenta melhor desempenho à fadiga. Nesta mesma figura observa-se que as curvas dos mastiques betuminosos com betume 35/50 apresentam uma tendência mais linear quando comparadas com as curvas dos mastiques com PMB 45/80-65, demonstrando uma maior curvatura, devido à influência dos polímeros. Deste modo, verifica-se um efeito no tipo de betume usado na formulação dos sistemas de suspensão no desempenho de fadiga. Além disso, os mastiques modificados apresentam uma menor energia dissipada do que os mastiques com 35/50, e portanto admitem uma maior resistência à fadiga, como definido pela literatura.

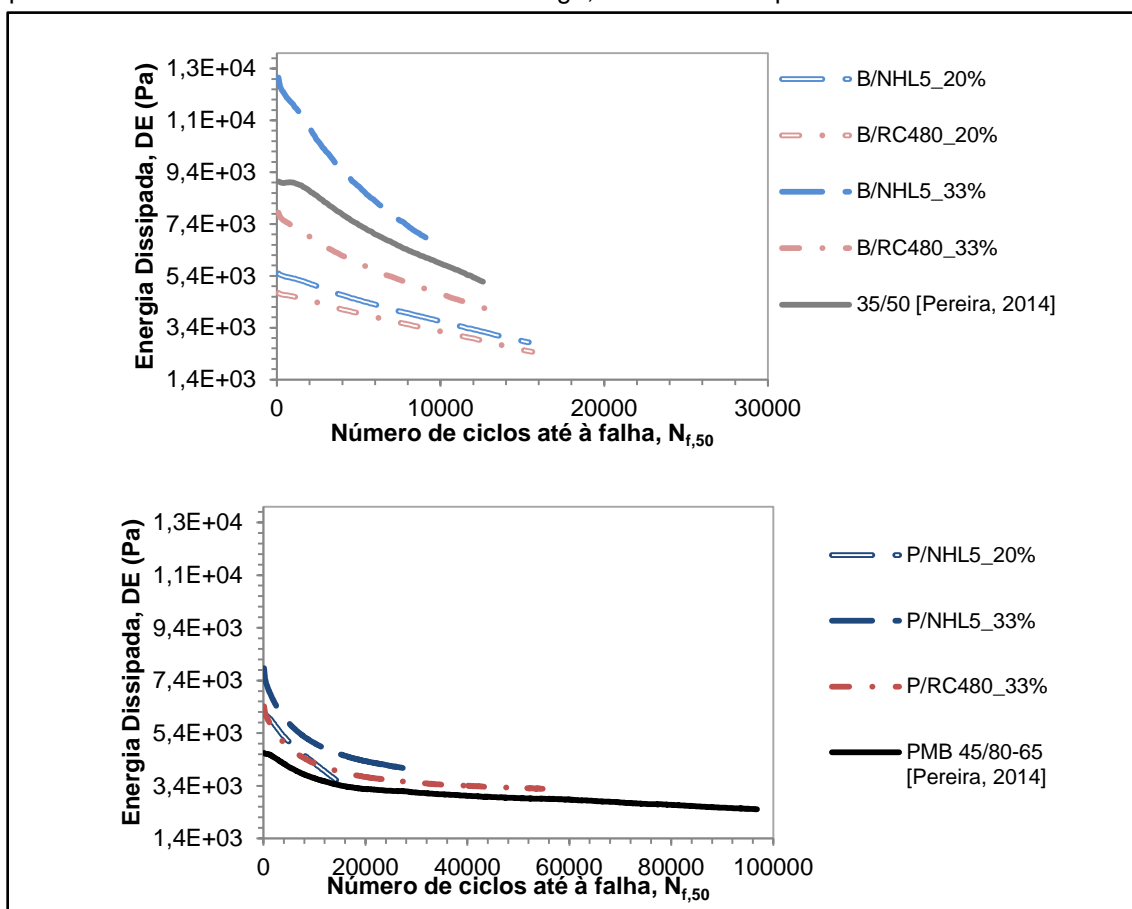


Figura 4.20 – Evolução da curva de energia dissipada em função do tempo de fadiga,  $N_{f,50}$ , quanto à influência do tipo de ligante

Apesar dos mastiques formulados com betume modificado apresentarem um grande decréscimo de energia dissipada nos primeiros ciclos de carregamento, após este período de carga apresentam uma tendência linear variando pouco nos resultados do parâmetro DE, o que significa que a ocorrência de danos se desenvolve de forma mais gradual do que nos mastiques de betume puro, e, portanto, conduzem a menores resultados de valores de PV, como demonstrados pelo Quadro 4.7.

Relativamente aos resultados de avaliação da capacidade auto-regeneradora dos mastiques, quando analisados conforme a influência no tipo de betume usado, apresentados no Quadro

4.7, verifica-se que os mastiques formulados com betume puro admitem menores valores de vida de fadiga do que os formulados com mastique modificado, explicados pela grande variação de energia dissipada apresentados na Figura 4.20, como observado nas conclusões dos resultados dos ensaios de fadiga usando a abordagem tradicional. Os resultados de valor de patamar dos modificados são inferiores aos dos mastiques com betume 35/50, ou seja apresentam maiores declives, o que significa que as suspensões modificadas admitem uma maior capacidade na auto-regeneração, conferida pela adesão interfacial entre fíler e polímeros contribui para uma maior resistência da interface e maior resistência à propagação do fendilhamento, observado na Figura 4.19. No entanto a partir da Figura 4.19 verifica-se uma evolução do valor de patamar não linear em função do período de repouso que pode estar associada às condições de ensaio e de armazenamento dos provetes de ensaio.

- Influência no tipo de fíler

Na Figura 4.21 verifica-se alguma influência no tipo de fíler utilizado, onde os mastiques com calcário admitem valores de energia dissipada inferiores aos dos mastiques de cal hidráulica, devido ao facto do calcário produzir mastiques menos rígidos e por possuírem graduações mais finas de fíler, como verificado na representação das curvas mestras das suspensões.

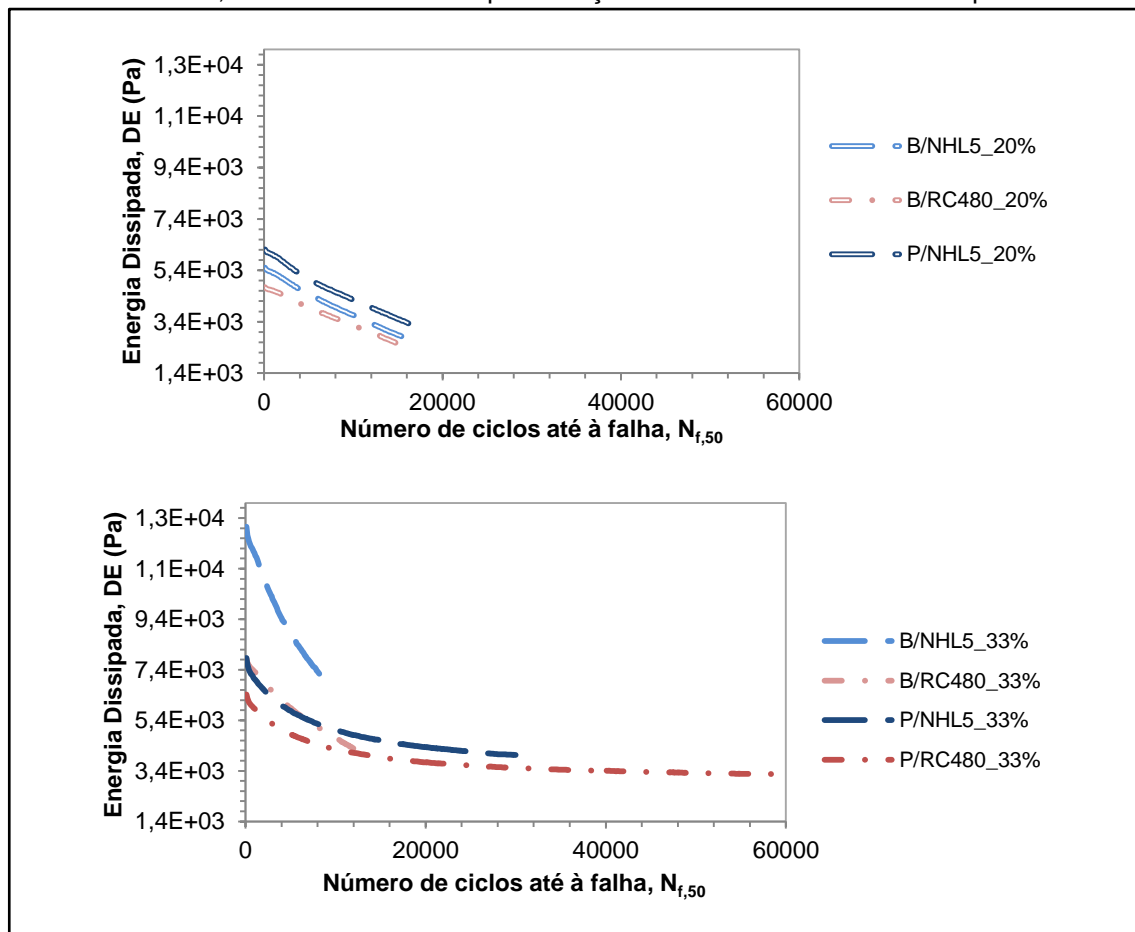


Figura 4.21 - Evolução da curva de energia dissipada em função do tempo de fadiga,  $N_{f,50}$ , quanto à influência do tipo de fíler

No entanto, as curvas dos mastiques de calcário assumem a mesma tendência de evolução do dano que os de cal hidráulica, pelo que não se verifica grandes diferenças nos valores do parâmetro PV entre eles, como observado no Quadro 4.7.

Na Figura 4.21, as curvas das suspensões do calcário apresentam um declive ligeiramente menos acentuado para os mastiques com calcário, e, portanto, apresentam um melhor desempenho face ao fendilhamento por fadiga, que vai de acordo com as conclusões obtidas pelos resultados dos ensaios de caraterização reológica.

- Influência no conteúdo em fíler

Os mastiques mais concentrados admitem uma maior dissipação de energia, quando comparados com os mastiques diluídos, como verificado pela Figura 4.22, denotando uma grande influência inerente ao conteúdo de fíler empregue nas formulações dos sistemas de suspensão. Esta situação deve-se ao facto da adição de fíler contribuir para uma menor resistência à fadiga da suspensão, ficando os respetivos mastiques suscetíveis a maiores taxas de dissipação de energia, o que está de acordo com o referido na secção anterior que avalia a resistência à fadiga segundo o critério tradicional.

Nos resultados de valor de patamar em relação aos valores da vida de fadiga nos ensaios de fadiga descontínuos, apresentados no Quadro 4.7 e na Figura 4.20, observa-se que os mastiques concentrados apresentam maiores resultados de valor patamar do que os mastiques diluídos, através da translação entre as retas mastiques de teores diferentes de fíler observado na Figura 4.19, pois admitem uma maior variação de energia dissipada, isto é, um maior declive, e portanto uma menor resistência à fadiga. Contudo, este facto não se verifica para a suspensão P/NHL5\_33%, que apresenta um valor de patamar bastante reduzido quando comparado com as restantes suspensões, o que não está de acordo com as referências bibliográficas, pois apresenta um declive reduzido na Figura 4.22. Esta situação pode estar possivelmente relacionada com o período de armazenamento.

No Quadro 4.7 verifica-se claramente a influência do teor de fíler na capacidade de auto-regeneração dos mastiques, onde os mastiques diluídos assumem valores de patamar inferiores aos respetivos mastiques concentrados, à exceção do sistema P/NHL5\_33%, o que significa que demoram menos tempo a regenerar e assim apresentam um melhor comportamento ao fendilhamento por fadiga, pois apresentam um maior conteúdo de betume livre, fração que contribui para a resistência à fadiga do composto.

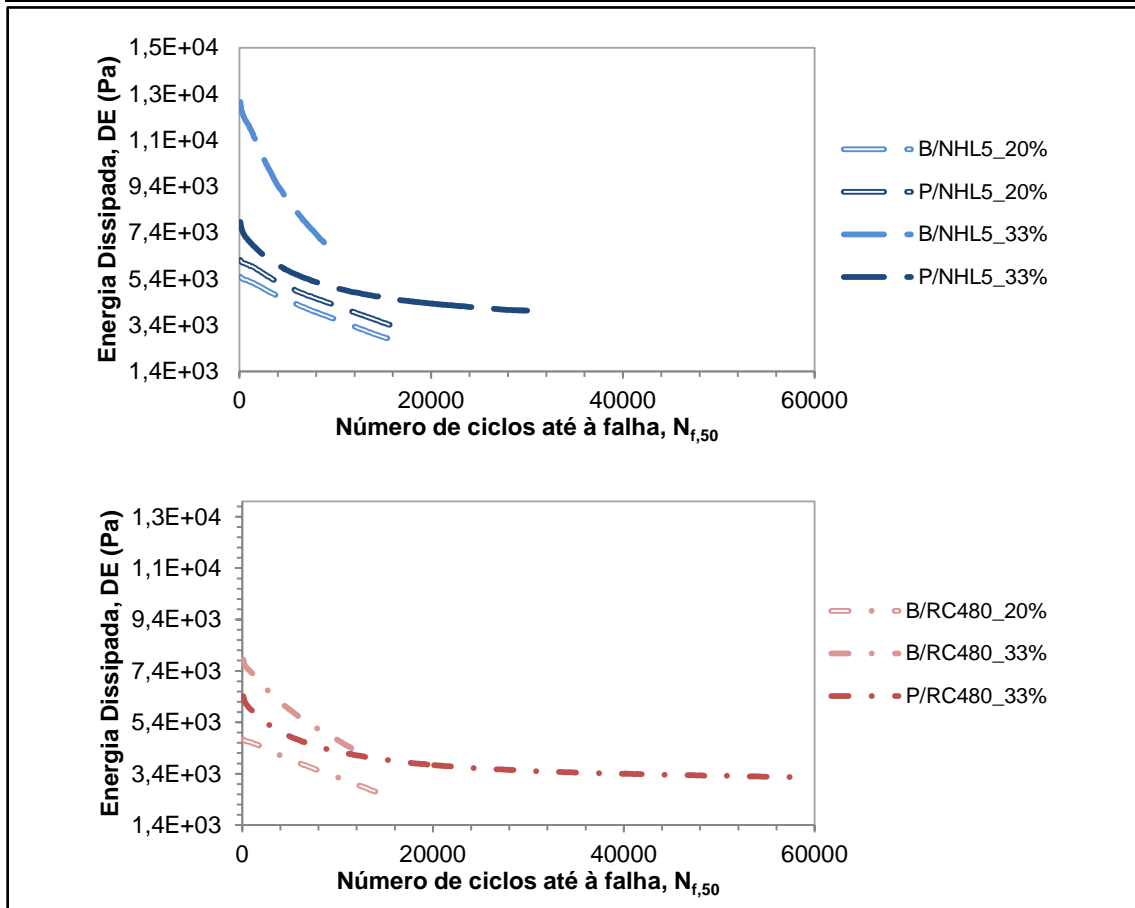


Figura 4.22 – Evolução da curva de energia dissipada em função do tempo de fadiga,  $N_{f,50}$ , quanto à influência do conteúdo de fíler

#### 4.2.2. Ensaios de fadiga com incremento sucessivo de deformação

##### 4.2.2.1. Resultados de varrimento de frequência

Nos ensaios de amplitude de deformação (LAS) efetuaram-se primeiro os varrimentos de frequência, donde se traçaram as curvas dos resultados médios de módulo complexo em função da frequência aplicada. Nestas curvas foi possível determinar-se os valores de  $\alpha$ , a partir dos declives de cada curva de varrimento de frequência do respetivo mastique betuminoso, estando definidos no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Resultados dos parâmetros  $m$  e  $\alpha$  a partir do varrimento de frequência

Materiais	$\alpha$
B/NHL5_20%	1,06
B/NHL5_33%	1,05
B/RC480_20%	1,08
B/RC480_33%	1,05
P/NHL5_20%	1,04
P/NHL5_33%	1,28
P/RC480_20%	1,23
P/RC480_33%	1,21

O valor do parâmetro  $\alpha$  foi obtido a partir da seguinte expressão (4.2), de acordo com o estabelecido pela norma AASHTO TP 101-12 (2012):

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (4.2)$$

A partir do Quadro 4.8 verifica-se que, em geral, os mastiques com betume puro possuem valores de parâmetro  $\alpha$  mais reduzidos, o que significa que o declive das curvas de módulo complexo em função da frequência é mais elevado.

Após a determinação destes parâmetros foi possível executar ensaios de varrimento de deformação, por forma a determinar o parâmetro de dano,  $D_f$ , através da expressão (4.3):

$$D_f = \left( \frac{0,35 \cdot C_0}{C_1} \right)^{1/C_2} \quad (4.3)$$

#### 4.2.2.2. Resultados de varrimento de deformação

A partir da Figura 4.23 é possível observar-se a evolução da tensão ao longo do ensaio. Segundo a literatura, verifica-se a ocorrência de danos nas amostras betuminosas, aquando da diminuição da tensão para a mesma deformação aplicada. Ou seja, quando se verifica uma baixa taxa de redução de tensão, significa que não se observa a ocorrência de danos na amostra.

Com a explicação acima referida tem-se que os mastiques modificados de calcário apresentam a menor taxa de variação de tensão de resposta para a deformação aplicada, significando que apresentam menores danos, que traduzem um melhor desempenho à fadiga, observado pela Figura 4.23. Consta-se que os mastiques concentrados assumem maior variação de tensão.

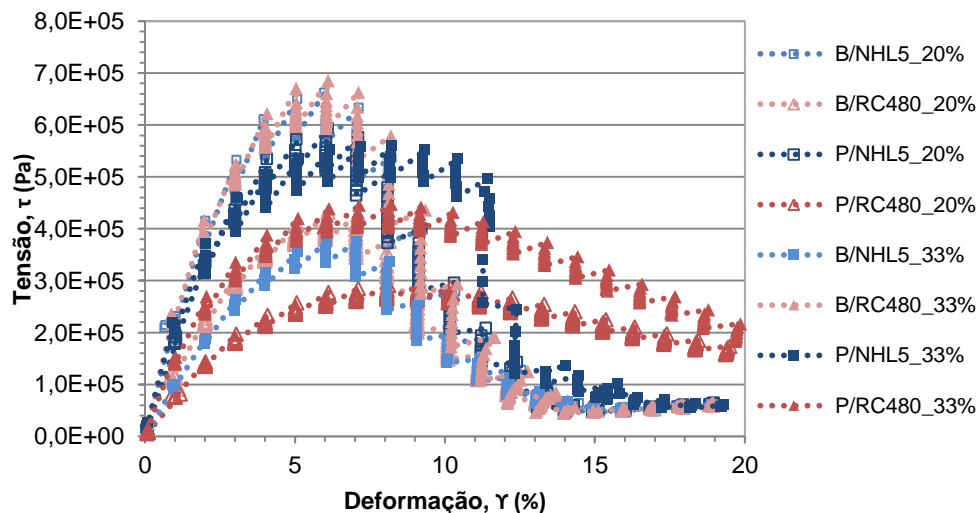


Figura 4.23 – Evolução ao longo de um ensaio de fadiga com incremento sucessivo de deformação

O dano acumulado ao longo do tempo,  $D(t)$ , foi estimado a partir da expressão (2.32) e depois efetuou-se um ajustamento através da expressão (2.34). Os resultados destes coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  estão apresentados no Quadro 4.9, tendo sido estimados a partir da expressão (4.4):



$$\log(C_0 - C(t)) = \log(C_1) + C_2 \cdot \log(D(t)) \quad (4.4)$$

A Figura 4.24 representa a evolução do parâmetro  $C(t)$  em função da deformação aplicada. Verifica-se que os mastiques diluídos atingem uma menor variação do parâmetro ao longo da gama de deformações aplicadas do que os mastiques concentrados. O que significa que se verifica uma progressão de danos mais lenta nos mastiques de menor teor em fíler.

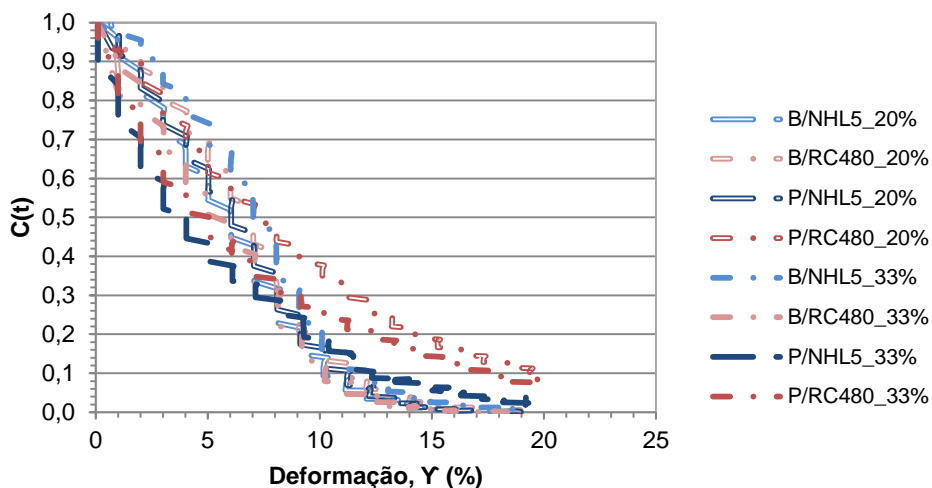


Figura 4.24 – Evolução do parâmetro  $C(t)$  em função da deformação aplicada no ensaio de fadiga com incremento sucessivo de deformação

Observando a Figura 4.25 tem-se que os mastiques com betume modificado acumulam mais dano do que os respetivos mastiques com betume puro, mantendo uma maior integridade do material por apresentarem resultados de  $C(t)$  maiores. Os resultados dos mastiques com betume puro atingiram um valor nulo de  $C(t)$ , o que significa que estas suspensões não admitem tanta capacidade em acumular dano como os mastiques modificados, assim evidencia-se o efeito do tipo de betume. Por exemplo, o mastique P/RC480\_20% permite acumulação de mais dano antes de ocorrer a falha, pois possui o maior valor de integridade, e portanto é que apresenta um melhor desempenho à fadiga, como observado pelo Quadro 4.9. Observa-se alguma influência no tipo de fíler utilizado nas formulações dos mastiques, onde os sistemas fíler-betume com calcário apresentam maiores valores de integridade que os de cal hidráulica. Contudo a curva de suspensão P/RC480\_33% deveria estar acima da curva da suspensão P/RC480\_20%, pois um maior teor em fíler na suspensão contribui para um menor taxa de evolução de dano ou seja menor valor de  $C(t)$ . Este resultado pode ter sido influenciado pelas condições de armazenamento dos materiais e pelo sistema de controlo de temperatura utilizado.

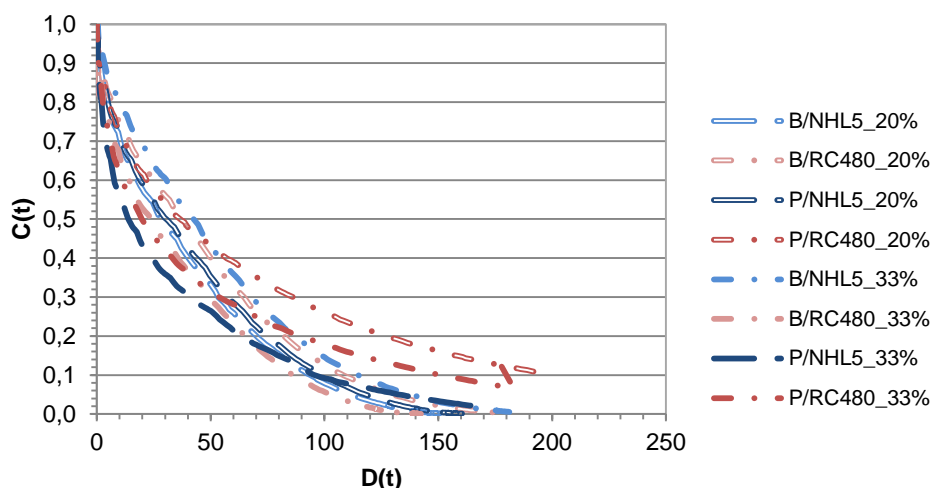


Figura 4.25 – Representação de  $C(t)$  versus  $D(t)$  dos mastiques betuminosos

Comparando os resultados do parâmetro de dano  $D_f$  entre os mastiques modificados e os de betume puro, observa-se que os mastiques concentrados apresentam valores de parâmetro dano superiores aos respectivos mastiques diluídos, como verificado pelo Quadro 4.9.

Quadro 4.9 – Valores dos coeficientes,  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  e do parâmetro de dano,  $D_f$

Materiais	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$D_f$
B/NHL5_20%	1	0,12	0,44	47,37
B/NHL5_33%	1	0,06	0,55	53,79
B/RC480_20%	1	0,08	0,49	52,94
B/RC480_33%	1	0,14	0,40	44,54
P/NHL5_20%	1	0,11	0,45	49,48
P/NHL5_33%	1	0,25	0,28	54,24
P/RC480_20%	1	0,12	0,38	81,60
P/RC480_33%	1	0,22	0,29	65,00

Os resultados de P/RC480\_20% e P/RC480\_33% não estão em concordância com o referido por Kim and Little (2005), pois a adição de fíler contribui para um aumento na resistência ao microfendilhamento devido à baixa taxa de evolução de dano. Contudo os resultados de parâmetro de dano estão em consonância com os apresentados pelas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25.

No Quadro 4.10 estão apresentados os resultados das constantes A e B e a vida de fadiga,  $N_f$ , segundo o ensaio de varrimento de deformação linear. Comparando estes resultados com os resultados dispostos no Quadro 4.9 observa-se que os mastiques com maior valor de  $D_f$  admitem maior valor de vida de fadiga, e portanto são mais resistentes à fadiga. Por exemplo, o mástico B/RC480\_33% apresenta um menor valor de vida de fadiga, pois a amostra foi completamente danificada e fendilhada no ensaio, e portanto admitiu uma pior resistência à fadiga.

A partir do Quadro 4.10 é possível observar-se que as suspensões com calcário apresentam maior valores de ciclos de carga até atingir falha do que as respectivas suspensões com cal hidráulica, o que traduz numa maior resistência ao fendilhamento por fadiga.

Quadro 4.10 – Valores das constantes A e B da lei de fadiga com base na abordagem do dano contínuo viscoelástico

<b>Materiais</b>	<b><math>N_f</math></b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>B/NHL5_20%</b>	13975	2,06E+04	2,12
<b>B/NHL5_33%</b>	16881	2,48E+04	2,10
<b>B/RC480_20%</b>	18294	2,71E+04	2,16
<b>B/RC480_33%</b>	12252	1,80E+04	2,10
<b>P/NHL5_20%</b>	14225	2,08E+04	2,08
<b>P/NHL5_33%</b>	50703	8,09E+04	2,56
<b>P/RC480_20%</b>	86904	1,36E+05	2,46
<b>P/RC480_33%</b>	56611	8,80E+04	2,42

Este critério de avaliação da resistência à fadiga permite ter uma melhor percepção da evolução do dano verificado ao longo do ensaio dos materiais betuminosos, constituindo, por este motivo, uma melhor opção para investigar o período de fadiga registrado nos mastiques betuminosos. Além do mais, estes ensaios apresentam uma grande vantagem em relação ao ensaio de fadiga a deformação controlada, em que admitem um período de ensaio bastante mais reduzido.

Comparando os resultados de fadiga a deformação controlada com os resultados de fadiga a incremento de deformação, as conclusões chegadas são opostas, na medida em que nos primeiros ensaios, os mastiques com maior teor em fíler assumem uma pior resistência à fadiga, e por outro lado, nos ensaios de varrimento de deformação linear (LAS), tem-se que a adição de fíler contribui para uma maior resistência ao micro-fendilhamento apresentando uma maior capacidade em acumular o dano por fadiga e por isso a um melhor desempenho de fadiga. No entanto, em ambos os ensaios, os mastiques modificados apresentam sempre uma melhor resistência à fadiga devido à interação entre o fíler e os polímeros.



## 5. Considerações finais

### 5.1. Conclusões

Este estudo tem como principal objetivo avaliar a contribuição da adição do fíler mineral no comportamento do ligante betuminoso, quanto ao seu comportamento reológico e à sua resistência ao fendilhamento por fadiga. Neste trabalho analisou-se também a influência da introdução de períodos de repouso nos ensaios de fadiga de deformação controlada, a fim de averiguar a capacidade de auto-regeneração dos mastiques betuminosos estudados.

Nesta pesquisa, os fíleres cal hidráulica e calcário são considerados fíler ativo e inerte, respetivamente, de acordo com o indicado pela literatura. E verificou-se que os mastiques formulados com um teor de fíler em volume de 20% e 33% são distinguidos por suspensões diluídas e concentradas através do modelo proposto por Faheem, que analisa o efeito de rigidez do fíler mineral no sistema fíler-betume.

No âmbito do presente trabalho obtiveram-se as seguintes conclusões:

- Observou-se que o mástico formulado com cal hidráulica admitiu maiores valores de módulo complexo para a mesma frequência do que os mastiques com calcário, através dos resultados dos ensaios de caracterização reológica, devido à atividade entre as partículas de fíler e volume adsorvido de betume;
- Os resultados de deformação limite linear (LVE) mostraram ser insensíveis ao tipo de fíler. No entanto, estes valores limite verificaram ser dependentes do conteúdo de fíler, onde os mastiques concentrados possuem valores inferiores aos apresentados nos mastiques diluídos, devido ao aumento da resposta elástica, conduzindo a um material mais rígido;
- Constatou-se neste estudo que os mastiques concentrados modificados por polímeros apresentam um comportamento mais elástico face aos restantes materiais, devido à presença de maior teor de betume fixo e à interação entre partículas elásticas e polímeros, sendo este facto mais perceptível na suspensão concentrada P/NHL5\_33%, por possuir fíler ativo;
- Nos resultados de caracterização reológica observou-se a presença de esqueleto mineral nos mastiques concentrados, a elevadas temperaturas e baixas frequências através do deslocamento vertical das curvas mestras do módulo complexo, em relação às dos mastiques diluídos e dos ligantes betuminosos;
- Na caracterização reológica dos mastiques diluídos não se verificou influência do tipo de ligante betuminoso e verifica-se pouca variação no efeito de rigidez do fíler quanto ao tipo de fíler, devido à ausência da interação hidrodinâmica entre partículas;
- Verificou-se uma grande influência no conteúdo de fíler nos mastiques betuminosos, tanto na caracterização reológica, como na avaliação da resistência à fadiga. Os mastiques concentrados apresentaram um menor desempenho à fadiga, para os ensaios de fadiga a deformação controlada, justificado pelo aumento da rigidez, quando comparado com os mastiques diluídos a 20%;

- Concluiu-se que mastiques formulados com fíler diferentes conduzem a resultados díspares tanto no seu comportamento reológico como no seu comportamento mecânico, devido às caraterísticas geométricas e à atividade de fíler, tendo-se observado que o mastique com calcário admite um melhor comportamento à fadiga, devido à inclusão de partículas finas minerais;
- Os modelos reológicos 2S2P1D e de Nielsen revelaram ser eficazes para prever o efeito de rigidez do fíler nos mastiques diluídos e concentrados estudados, constituindo uma alternativa eficaz em relação aos ensaios laboratoriais morosos;
- Na modelação com o modelo 2S2P1D verificou-se que adição do fíler no betume provocou o aumento do valor das constantes  $G_0$  e  $G_\infty$ , devido ao efeito de rigidez inerente à inclusão de partículas finas sólidas elásticas. No ajuste do modelo 2S2P1D foi apenas necessário ajustar 2 parâmetros à curva experimental dos resultados de varrimento de frequência obtidos, pois as 5 restantes constantes admitiam os mesmos valores obtidos na modelação dos betumes;
- Nos ensaios de fadiga a deformação controlada de 2%, verificou-se que os materiais são mais sensíveis ao fendilhamento por fadiga. O aumento do período de repouso induz ao melhor desempenho de fadiga, inerente ao efeito de auto-regeneração;
- Verificou-se ser possível estabelecer-se uma relação única entre PV e  $N_{f,50}$ , independentemente do tipo de ligante betuminoso, do tipo de fíler e do conteúdo de fíler, obtendo-se um bom ajustamento;
- Nos ensaios de avaliação de resistência ao fendilhamento por fadiga, as suspensões modificadas apresentam valores de vida de fadiga sempre superiores aos dos mastiques com betume puro, devido à interação entre o fíler-polímero. Estes mastiques apresentam uma menor variação de dissipação de energia, e portanto uma maior capacidade de acumulação de dano, o que indica um melhor desempenho à fadiga;
- Quando se efetuou a comparação da vida de fadiga obtida entre os ensaios LAS e os ensaios de deformação controlada verificou-se uma discrepância de resultados, associados aos diferentes procedimentos de ensaio e aos critérios de avaliação de fadiga serem diferentes e arbitrários. Contudo, observou-se que os ensaios de LAS são mais eficazes para avaliação a resistência à fadiga dos mastiques betuminosos.

Conclui-se que para situação de deformação controlada é aconselhável utilizar mastiques com menor teor de fíler fino, como o pó de calcário, modificados com adição de polímeros, e para situações de tensão controlada é recomendada a utilização de mastiques concentrados modificados de fíler calcário, pois admitem melhor comportamento face à resistência ao fendilhamento por fadiga.

Os resultados obtidos dos parâmetros reológicos e dos parâmetros de fadiga apresentaram uma grande variabilidade. Eventualmente os ensaios podem ter sido influenciados pelas condições de ensaio empregues e pelo período de armazenamento de provetes de ensaio, pois este ultrapassou os limites recomendados pela norma EN 14770 (2012).

Este tema de dissertação aborda assuntos relativamente recentes, sendo que não existe procedimentos de ensaio de caracterização reológica e mecânica indicados para os mastiques betuminosos. Considera-se que esta investigação poderá contribuir para um melhor entendimento do efeito de adição de fíler no comportamento reológico e mecânico do ligante betuminoso observado nas condições de serviço.

### 5.2. Desenvolvimentos futuros

Após a elaboração do presente estudo considera-se importante dar continuação ao presente estudo, através da exploração mais detalhada de aspectos relacionados com a caracterização do comportamento reológico e mecânico do mastic betuminoso.

Posto isto apresentam-se as seguintes sugestões para desenvolvimentos futuros:

- Efetuar a caracterização reológica e mecânica dos mastiques estudados, utilizando ligantes betuminosos envelhecidos a diferentes processos de envelhecimento, de modo a analisar o efeito do envelhecimento no comportamento do mastic betuminoso prestado em serviço;
- Efetuar a caracterização reológica dos mastiques usados no presente trabalho recorrendo a um sistema de controlo de temperatura de banho de fluido dos provetes de ensaio, para analisar a influência do tipo de sistema de controlo de temperatura nos resultados reológicos;
- Realizar ensaios de fadiga a tensão controlada dos mastiques estudados, a fim de avaliar o efeito do modo de carregamento de ensaio nos ensaios de avaliação de resistência ao fendilhamento por fadiga;
- Estudar o comportamento de mastiques betuminosos formulados com maior e menor teor de fíler aos utilizados do presente trabalho, de modo a melhor analisar o efeito de rigidez do fíler no modelo concetual de Faheem;
- Realizar ensaios de fadiga a deformação controlada contínuos e descontínuos utilizando temperaturas de ensaio mais reduzidas;
- Fazer uma análise mais aprofundada dos modelos reológicos e micromecânicos de previsão de rigidez de fíler no comportamento reológico da suspensão fíler-betume;
- Realizar ensaios de caracterização reológica e mecânica de mastiques formulados com outros fíleres (como, a cal hidratada e o cimento), de modo a investigar melhor a influência do tipo de fíler no seu comportamento prestado em serviço;
- Efetuar a caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga e capacidade de auto-regeneração de misturas betuminosas, recorrendo a uma análise comparativa.

Por último considera-se interessante proceder a ensaios de caracterização reológica e de avaliação da resistência ao fendilhamento de fadiga utilizando os mastiques estudados, recorrendo a outro tipo de ensaio, como ensaios de fluência e de relaxação.





## Referências bibliográficas

- Airey, G. D.**, *"Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens"*, PhD Thesis, the University of Nottingham, 1997
- Airey, G.D., Carpenter, S.H., Huang, H., Shen, S.**, *"A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation"*, Road Materials and Pavement Design, Vol. 7 No. 1, pp. 47-69, 2006
- Airey, G.D., Chen, J., Liao, M.**, *"Characterization of Viscoelastic Properties of Bitumen-Filler Mastics"*, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 9, 2013
- Airey, G.D., Collop, A.C., Rahimzadeh, B.**, *"Linear Viscoelastic Performance of Asphaltic Materials"*, Road Materials and Pavement Design, 4:3, pp. 269-292, 2003
- Anderson, D.A.**, *"Influence of Fines on Performance on Asphalt Concrete Mixtures"*, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, 1996
- Anderson, D.A., Bahia, H.U., Dongre, R.**, *"Rheological Properties of Mineral Filler-Asphalt Mastics and its Importance to Pavement Performance"*, Effects of Aggregates and Mineral Fillers on AMP, pp. 131-145, 1992
- Antunes, V.**, *"Influência do Fíler no comportamento dos Mastiques Betuminosos"*, Faculdade de Ciências e de Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2013
- Bardini, V.S.**, *"Influência do Fíler Mineral em Propriedades de Misturas Asfálticas Densas"*, Tese de Doutorado, Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013
- Bardini, V.S., Klinsky, L.M., Fernandes Jr., J.L.**, *"A Importância do Fíler para o bom desempenho de Misturas Asfálticas"*, Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Minerva – Pesquisa e Tecnologia, 7:1, pp. 71-78, 2011
- Bardini, V.S., Klinsky, L.M., Fernandes Jr., J.L., Roque, R.**, *"Influência do fíler Mineral no Comportamento Reológico de Mástiques Asfálticos"*, Transportes, Vol. 20, No. 4, pp. 19-26, 2012
- Benedetto, H.D., Delaporte, B., Olard, F., Sauzéat, C.**, *"Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: From Binders to Mixes"*, Road Materials and Pavement Design, EATA, pp. 163-202, 2004
- Boudabbous, M., Millien, A., Petit, C., Neji, J.**, *"Shear test to evaluate the fatigue of asphalt materials"*, Road Materials and Pavement Design, 14:sup1, pp. 86-104, 2013
- Chen, J.S., Peng, C.H.**, *"Analyses of Tensile Failure Properties of Asphalt-Mineral Filler Mastics"*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.10, No 4, pp. 256-262, 1998
- Chen, X., Huang, B., Shu, X.**, *"Effects of Mineral Fillers on Hot-Mix Asphalt Laboratory-Measured Properties"*, International Journal of Pavement Engineering, 8:1, pp. 1-9, March 2007
- Cidade, T.**, *"Reologia de Polímeros – Texto de apoio"*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2005
- Daniel, J. S., Kim, R. Y.**, *"Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixture"*, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 13:6, pp. 434-440, 2001

**Delaporte, B., Benedetto, H. D., Chaverot, P., Gauthier, G.,** *“Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials including new products made with ultrafine particles”*, Road Materials and Pavement Design, 10:1, pp.7-38, 2009

**Faheem, A. F.,** *“Modelling of Asphalt Mastic in Terms of Filler-Bitumen Interaction”*, University of Wiscosin, Madison, 2009

**Faheem, A. F., Bahia, H. U.,** *“Modelling of Asphalt Mastic in Terms of Filler-Bitumen Interaction”*, Road Materials and Pavement Design, 11:1, pp. 281-303, 2010

**Ferrigno, T. H.,** *“Principles of filler selection and use”*, Handbook of fillers for plastics, H. S. Katz and I. V. Milewski, eds, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 8-61, 1987

**Genovese, D. B.,** *Shear rheology of hard-sphere, dispersed, and aggregated suspensions, and filler-matrix composites*, Advances in Colloidal and Interface Science, 2012

**Ghaffarpour Jahromi, S., Vossough, S., Andalibizade, B., Smith, B., J.,** *“Fatigue and Low Temperature Fracture in Bitumen Mastic”*, Petroleum Science and Technology, 32:3, pp. 267-273, England, 2014

**Gubler, R., Liu, Y., Anderson, D.A., Partl, M. N.,** *“Investigation of the System Filler and Asphalt Binders by Rheological Means”*, Presentation at the 1999 AAPT Annual Meeting, Publication as a Part of the AAPT Journal, 1998

**Guimarães, M. F.,** *“Regeneração de betumes no âmbito da reciclagem a quente em central”*, Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2012

**Hesami, E., Jelagin, D., Kringos, N., Birgisson, B.,** *“An empirical framework for determining asphalt mastic viscosity as a function of mineral filler concentration”*, Construction and Building Materials, v.35, pp.23-29, 2012

**Johnson, C. M.,** *“Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method”*, PhD Thesis, University of Wisconsin – Madison, Madison, USA, 2010

**Kim, Y.-R, Little, D. N.,** *“Linear Viscoelastic Analysis of Asphalt Mastics”*, Journal of Materials in Civil Engineering, 16(2), 122-132, 2004

**Krieger, I.M., Dougherty, T. J.,** *“A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres”*, Transactions of the Society of Rheology, vol.3, pp. 137-152, 1959

**Lesueur, D. and Little, D.N.,** *“Effect of hydrated lime on rheology, fracture, and aging of bitumen”*, Transportation Research Record 1661, pp. 93–100, 1999

**Liao, M.,** *“Small and Large Strain Rheological and Fatigue Characterisation of Bitumen-Filler Mastics”*, PhD Thesis, The University of Nottingham, School of Civil Engineering, 2007

**Liao, M., Chen, J., Tsou, K.,** *“Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures”*, Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, pp. 916-923, 2012

**Lu, X., Soenen, H., Redelius, P.,** *“Fatigue and Healing Characteristics of Bitumens Studied Using Dynamic Shear Rheometer”*, Proceedings of the sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, Switzerland, 2003

**Matos, P.G.,** *“Temperaturas de Fabrico e de Compactação de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados: Interacção Agregado-Betume”*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e de Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012

- Micaelo, R., Matos, P., Duarte, C.,** “Comportamento do Mastique Betuminoso a Temperaturas Elevadas: Influência do Fíler e do Betume”, Congresso Rodoviário Português, 10 a 12 de Abril 2013
- Nielsen, L. E.,** “Generalized Equation for the Elastic Moduli of Composite Materials”, Journal of Applied Physics, 1970
- Nielsen, L. E., Lee, B.-L.,** “Dynamic Mechanical Properties of some polystyrene composites”, National Technical Information Service, Monsanto Research Corporation, 1971
- Olard, F., Di Benedetto, H.,** “General “2S2P1D” Model and Relation between the Linear Viscoelastic Behaviors of Bituminous Binders and Mixes”, Road Materials and Pavement Design, Vol. 4:2, pp. 185-224, 2003
- Osman, S. A.,** “The Role of Bitumen and Bitumen/Filler Mortar in Bituminous Mixture Fatigue”, PhD Thesis, University of Nottingham, School of Civil Engineering, 2004
- Pal, R.,** “Complex Shear Modulus of Concentrated Suspensions of Solid Spherical Particles”, Journal of Colloidal and Interfacial Science, Department of Chemical Engineering, University of Waterloo, pp.171-177, 2002
- Pereira, A.,** “Caracterização Reológica e Avaliação da Resistência à Fadiga de Betumes com Reómetro de Corte Dinâmico”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e de Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2014
- Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger, P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., Anderson, D.A., Christiansen, D.W., Bahia, H.U., Dongre, R., Antle, C.E., Sharma, M.G., Button, J.W. and Glover, C. J.,** “Binder Characterization and Evaluation, Volume 4: Test Method, SHRP-A-370 Report”, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., 1994
- Read, J., Whiteoak, C.D.,** “The Shell Bitumen Handbook”, Fifth Edition, Shell Bitumen UK, Thomas Telford Publishing, London, United Kingdom, 2004
- Rigden, P. J.,** “The Use of Fillers in Bituminous Road Surfacing. A Study of Filler-Binder Systems in Relation to Filler Characteristics”, Journal of the Society of Chemical Industry, article, 1947
- Santos, J.M.,** “Materiais utilizados na construção de Pavimentos Rodoviários”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Portugal, 2010
- Scholtz, T.V.,** “Durability of Bituminous Paving Mixtures”, Tese de Doutoramento, The University of Nottingham, School of Civil Engineering, 1995
- Silva, H. M.,** “Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique: Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal, 2005
- Silva, H., Pais, J., Pereira, P., Capitão, S.,** “Laboratory Tests to Characterize the Mastics of Bituminous Mixtures”, International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Belfast, Irlanda do Norte, 2005
- Soenen, H., Teugels, W.,** “Rheological Investigation of Binder-Filler Interactions”, Eurobitume Workshop 99 – Performance Related Properties for Bituminous Binders, Paper No. 102, Group Competence Centre, Sweden, 1999
- Tadros, T. F.,** “Correlation of viscoelastic properties of stable and flocculated suspensions with their interparticle interactions”, Advances in Colloid and Interface Science, v. 68, pp. 97-200, 1996

**Tadros, T. F.**, *“Interparticle interactions in concentrated suspensions and their bulk (rheological) properties”*, Advances in Colloid and Interface Science, v. 168, pp. 263-277, 2011

**Taylor, R.**, *“Surface Interactions between bitumen and mineral fillers and their effects on the rheology of bitumen-filler mastics”*, Thesis for degree of Doctor of Philosophy, University of Nottingham, 2007

**Van den bergh, W.**, *“The Effect of Ageing on the Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars”*, PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2011

**Yussof, N.**, *“Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders”*, PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 2012

## Referências normativas

**AASHTO TP 101-12 (2012)** – *“Standard Method of Teste for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep”*, ASTM, USA

**EN 14770 (2012)** – *“Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR)”*, CEN, Brussels

**NP EN 12594 (2009)** – *“Betumes e ligantes betuminosos – Preparação de amostras de ensaio”*, IPQ, Caparica, Portugal



## Apêndice A – Cálculo da relação fíler-betume usado na formulação do mastique betuminoso

Com o conhecimento do valor da relação fíler-betume em volume é importante estimar as quantidades de fíler e de betume em massa a utilizar no fabrico do mastique betuminoso. Para tal recorreram às expressões imediatamente abaixo para primeiramente determinar as quantidades dos materiais constituintes em volume:

$$b = 1 - b * \frac{f}{b} \quad (\text{A.1})$$

$$f = b * \frac{f}{b} \quad (\text{A.2})$$

$$f + b = 100 \quad (\text{A.3})$$

Onde  $b$  é betume em volume (%),  $f$  é fíler em volume (%) e  $f/b$  em relação fíler-betume.

Posteriormente determinou-se a relação fíler-betume em massa, com base nas massas volúmicas dos mesmos definidos no Quadro 3.3, de acordo com a equação abaixo:

$$\left(\frac{f}{b}\right)_m = \left(\frac{f}{b}\right)_v \cdot \frac{m.v.f}{m.v.b} \quad (\text{A.4})$$

Em que  $(f/b)_m$  é a relação em massa de fíler-betume,  $G_f$  é a massa volúmica de fíler ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $G_b$  é a massa volúmica de betume ( $\text{kg/m}^3$ ).

Por fim, as quantidades em massa de fíler e de betume são estimadas a partir das expressões (A.1) e (A.2) utilizando a relação fíler-betume em massa, resultando em valores de massa em gramas.

No Quadro A.1 estão apresentadas as relações fíler-betume em massa e as quantidades em massa e em volume de fíler e de betume dos mastiques estudados.

Quadro A.1 – Relação fíler-betume em massa e quantidades em massa e em volume de fíler e de betume dos mastiques estudados

Material	$(f/b)_m$	% fíler		% betume	
		em massa	em volume	em massa	em volume
B/NHL5_20%	0,65	39,5	20	60,5	80
B/RC480_20%	0,66	39,8	20	60,2	80
P/NHL5_20%	0,65	39,5	20	60,5	80
P/RC480_20%	0,66	39,8	20	60,2	80
B/NHL5_33%	1,31	56,6	33,3	43,4	66,7
B/RC480_33%	1,32	56,9	33,3	43,1	66,7
P/NHL5_33%	1,31	56,6	33,3	43,4	66,7
P/RC480_33%	1,32	56,9	33,3	43,1	66,7





## Apêndice B – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do B/NHL5\_20%

Quadro B.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique B/NHL5\_20%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	608167	110140	19780	4053	329	92
0,15	859133	160467	29217	6062	494	139
0,2	1101467	208600	38450	8077	660	186
0,5	2318667	477300	91677	19893	1654	469
0,8	3424667	714333	141733	31340	2640	752
1	4039333	869800	174467	38957	3294	943
1,5	5555000	1233667	253200	57527	4915	1409
2	7045667	1575333	329033	75713	6522	1881
5	13020000	3395333	748567	179533	16033	4679
8	17710000	4857667	1128333	277700	25107	7311
10	20590000	5750333	1350667	340833	31103	9206

Quadro B.2 – Valores médios do ângulo de fase (°) do mastique B/NHL5\_20%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	78,04	83,11	86,32	88,28	89,54	89,59
0,15	76,51	81,98	85,79	87,97	89,54	89,53
0,2	75,72	81,32	85,32	87,82	89,48	89,64
0,5	72,78	79,12	83,85	86,77	89,09	89,56
0,8	70,24	78,41	83,22	86,16	88,73	89,31
1	69,52	77,56	82,72	85,97	88,66	89,47
1,5	68,28	76,19	81,90	85,33	88,32	89,31
2	66,68	75,85	81,32	84,84	88,09	89,13
5	62,62	71,48	79,27	83,05	87,31	88,61
8	59,55	70,60	77,67	81,69	86,52	87,89
10	57,19	67,84	77,90	81,18	86,46	87,79



## Apêndice C – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do B/RC480\_20%

Quadro C.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique B/RC480\_20%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	505400	91003	16487	1231	297	87
0,15	717133	131967	24320	1839	442	130
0,2	921467	168867	32087	2448	587	173
0,5	1965333	397733	76867	6066	1459	429
0,8	2881333	595600	118933	9499	2320	681
1	3497333	727200	146633	11873	2890	852
1,5	4855000	1035333	212800	17103	4315	1272
2	5934667	1316667	277267	23317	5740	1694
5	11206667	2857667	632533	55960	13993	4199
8	15656667	4093333	958967	86313	22090	6672
10	18206667	4901000	1178000	106067	27637	8346

Quadro C.2 – Valores médios do ângulo de fase (°) do mastique B/RC480\_20%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	78,61	83,30	86,22	88,29	88,23	88,28
0,2	77,17	82,17	85,80	88,23	88,33	88,41
0,2	76,41	81,76	85,40	88,19	88,32	88,22
0,5	73,82	79,65	84,05	87,40	88,32	88,17
0,8	71,91	78,98	83,44	87,14	88,35	88,31
1	68,48	78,22	83,01	86,98	88,33	88,42
2	70,77	77,01	82,27	85,94	88,10	88,54
2	67,56	76,24	81,72	86,41	87,94	88,56
5	63,95	72,94	79,74	84,51	87,07	88,19
8	60,25	71,08	78,47	83,91	86,66	87,75
10	59,16	68,98	78,48	83,64	86,39	87,25



## Apêndice D – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do P/NHL5\_20%

Quadro D.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique P/NHL5\_20%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	373600	93340	25480	2678	939,2	411,2
0,15	510200	128400	35310	3654	1268	548,8
0,2	637400	160400	44360	4572	1585	678,2
0,5	1292000	325100	91450	9524	3262	1353
0,8	1772000	457400	130100	13850	4564	1857
1	2155000	546700	154900	16400	5587	2259
1,5	2794000	744900	211500	24050	7733	3122
2	3564000	926400	264500	29060	9952	3892
5	6858000	1884000	535100	59530	19960	8112
8	9449000	2646000	767500	85120	29500	11730
10	10950000	3221000	911400	102100	34600	14110

Quadro D.2 – Valores médios do ângulo de fase (°) do mastique P/NHL5\_20%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	69,22	70,35	70,77	69,26	66,05	65,00
0,15	68,37	69,21	70,11	68,84	66,51	64,87
0,2	68,16	68,92	69,94	70,02	67,52	65,33
0,5	67,65	68,58	69,49	71,60	69,74	67,71
0,8	66,77	69,27	69,95	71,29	70,91	68,36
1	66,97	68,84	69,59	69,88	71,18	68,99
1,5	65,91	68,39	69,47	73,76	71,32	69,75
2	68,33	68,91	69,49	71,66	72,20	70,26
5	62,76	67,91	69,33	70,28	70,21	71,99
8	61,24	67,14	69,36	69,81	70,34	71,16
10	60,45	67,64	69,45	70,06	72,45	71,08



## Apêndice E – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do P/RC480\_20%

Quadro E.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique P/RC480\_20%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	345633	84220	23600	2206	729	296
0,15	473567	115933	32623	3057	1002	403
0,2	592400	144933	40867	3880	1271	504
0,5	1205667	295800	84187	8282	2718	1053
0,8	1650333	412700	118867	11880	3919	1504
1	2009000	498967	142533	14350	4711	1807
1,5	2773000	684267	194833	19013	6604	2513
2	3403667	851500	243633	25667	8221	3178
5	6498667	1745000	494933	51123	17670	6761
8	8893333	2455000	713367	73773	26070	9887
10	10390000	2896000	846700	87770	30600	11887

Quadro E.2 – Valores médios do ângulo de fase (°) do mastique P/RC480\_20%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	69,72	70,63	70,66	72,48	70,47	68,81
0,15	68,82	69,55	70,02	71,79	70,33	68,59
0,2	68,60	69,30	69,88	72,34	71,22	69,22
0,5	68,22	69,22	69,72	72,28	72,18	70,57
0,8	66,32	69,52	70,08	71,86	73,46	72,15
1	67,43	69,44	69,86	72,31	72,90	72,20
1,5	66,52	69,26	69,79	71,39	72,52	72,19
2	67,07	69,21	69,79	71,14	73,14	72,48
5	63,28	69,30	69,73	70,85	70,81	73,23
8	61,17	67,68	69,64	70,40	72,42	72,55
10	60,59	67,29	69,62	70,52	72,92	72,48





## Apêndice F – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do B/NHL5\_33%

Quadro F.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique B/NHL5\_33%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	1228333	221800	40747	3057	719	210
0,15	1720000	316000	58960	4514	1064	310
0,2	2196667	409167	77100	5984	1414	413
0,5	4791333	938367	183067	14627	3523	1035
0,8	6960667	1369333	281500	23133	5580	1640
1	8268667	1690000	346100	28427	6974	2051
1,5	11210667	2372667	501333	42780	10420	3068
2	13886667	3091000	650800	56207	13807	4101
5	26530000	6490333	1482667	133333	33860	10143
8	36326667	9465333	2202667	208933	53490	16127
10	41383333	11259333	2734667	257467	65443	20080

Quadro F.2 – Valores médios do ângulo de fase (°) do mastique B/NHL5\_33%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	78,03	81,76	84,98	88,22	88,39	87,74
0,15	76,37	81,42	85,11	88,30	88,78	88,04
0,2	76,02	81,05	84,79	88,16	88,73	88,51
0,5	73,90	79,02	83,58	87,39	88,45	88,74
0,8	73,56	78,46	83,30	87,00	88,61	88,96
1	70,56	78,03	82,87	87,22	88,59	89,10
1,5	67,88	76,71	82,05	87,75	88,35	89,04
2	67,53	75,79	81,59	86,47	88,08	88,86
5	61,94	73,94	79,90	83,74	87,59	88,72
8	58,71	70,69	78,19	83,57	86,50	88,20
10	56,84	69,68	78,40	82,72	86,38	88,24



## Apêndice G – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do B/RC480\_33%

Quadro G.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique B/RC480\_33%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	1119500	194250	37395	2140	498	145
0,15	1582500	282500	54855	3101	744	215
0,2	2027500	366600	72230	4111	993	287
0,5	4429000	847700	172200	10188	2483	719
0,8	6645500	1242500	265250	16090	3955	1146
1	7502500	1539000	326850	20200	4940	1432
1,5	10320000	2179000	474450	29645	7398	2145
2	12895000	2841500	616200	38955	9787	2863
5	25185000	6122500	1401500	93715	23960	7132
8	33525000	8690500	2082500	145500	37900	11270
10	38505000	10245000	2583000	179300	46825	14145

Quadro G.2 – Valores médios do ângulo de fase (°) do mastique B/RC480\_33%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	78,85	83,41	86,16	88,92	88,94	88,52
0,15	77,10	82,45	85,74	88,69	89,29	88,83
0,2	76,61	81,81	85,36	88,55	89,18	88,90
0,5	74,24	79,67	83,96	87,84	88,96	89,18
0,8	75,07	78,79	83,40	87,68	88,76	89,20
1	71,98	78,35	82,97	86,66	88,61	89,25
1,5	64,56	77,17	82,14	86,86	88,38	89,29
2	69,68	77,22	81,69	86,09	88,30	89,11
5	63,68	74,73	79,66	85,00	87,34	88,68
8	60,69	71,26	78,22	83,79	86,93	88,16
10	59,58	70,75	78,60	83,34	86,52	88,24



## Apêndice H – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do P/NHL5\_33%

Quadro H.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique P/NHL5\_33%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	820367	215133	64913	22897	4495	2000
0,15	1070367	279133	84313	29543	5654	2524
0,2	1316000	339200	102047	35463	6757	3010
0,5	2502000	643467	190100	65343	11090	4936
0,8	3554333	867567	256033	87320	15475	6786
1	4294333	1038333	303033	103470	18070	7848
1,5	5809667	1401000	402700	137233	24825	10140
2	6843333	1736000	495033	168067	28770	12550
5	13263333	3496667	970733	323233	53095	22535
8	18316667	4748333	1372667	455200	72480	30005
10	20956667	5613333	1638000	534667	83355	35860

Quadro H.2 – Valores médios do ângulo de fase (°) do mastique P/NHL5\_33%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	65,41	63,20	60,52	56,03	52,49	55,25
0,15	65,25	63,25	60,83	57,10	49,20	51,90
0,2	65,93	63,79	61,47	58,20	52,48	53,62
0,5	66,92	65,24	63,29	61,15	56,32	55,40
0,8	65,54	67,14	64,95	63,06	56,60	55,56
1	66,24	66,97	64,85	63,28	58,16	57,05
1,5	64,18	67,34	65,47	63,93	61,97	58,09
2	64,58	68,39	66,13	64,51	62,31	60,17
5	62,56	67,06	67,90	65,86	63,84	60,72
8	60,76	67,71	68,32	66,69	62,95	61,78
10	60,13	68,38	68,77	67,05	63,85	62,88



## Apêndice I – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase do P/RC480\_33%

Quadro I.1 – Valores médios do módulo complexo (Pa) do mastique P/RC480\_33%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	611933	136900	33893	9560	1067	372
0,15	827400	186967	46990	13367	1495	521
0,2	1037000	234767	59247	16973	1926	672
0,5	2071667	487300	124433	36627	4232	1494
0,8	2975000	685333	176567	52590	6399	2212
1	3560333	831267	214167	63760	7856	2703
1,5	4949667	1148000	296800	89010	11127	3935
2	6011000	1444000	373233	112367	14317	5036
5	11240000	3001000	778900	236367	30693	11193
8	15630000	4206333	1066100	345400	45030	16710
10	18040000	4984000	1355000	413667	54230	20140


Quadro I.2 – Valores médios do ângulo de fase (°) do mastique P/RC480\_33%

frequência (Hz)	Temperatura (°C)					
	25	35	45	55	65	75
0,1	70,22	71,66	73,10	73,66	77,08	77,09
0,15	69,61	71,20	72,37	73,35	76,35	76,78
0,2	69,61	71,07	72,25	73,58	77,11	77,16
0,5	69,27	70,97	71,99	73,17	78,26	78,20
0,8	67,96	71,32	72,33	73,27	76,92	77,52
1	66,41	71,13	72,23	73,09	77,71	78,17
1,5	69,20	70,83	72,06	72,89	76,85	77,91
2	66,29	70,94	72,15	72,69	77,53	78,17
5	61,97	70,15	72,00	72,50	74,30	76,94
8	60,83	68,89	72,40	72,01	74,36	76,45
10	59,86	68,52	71,64	71,86	73,99	77,25





## Anexo A – Certificado de qualidade do betume 35/50

 galp energia LOGÍSTICA		<b>Certificado de Qualidade</b> N.º de Série (Serial Number): 076/2012 Data de Emissão (Issue date): 2012-03-19		
<b>PRODUTO (Product):</b> <b>LOTE (Batch nr.):</b>		<b>Betume de Pavimentação 35/50</b> <b>5649/016/12</b>		
Documentos de referência: Relatórios de Ensaio N.º		Emitido pelo laboratório acreditado N.º 0/L44 segundo a NP EN ISO/IEC 17025		
<b>MÉTODO</b>	<b>PROPRIEDADE</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>Valores limite</b>	
EN 1426	Penetração a 25°C, 100g, 5s	0.1 mm	43	35-50
EN 1427	Temperatura de Amolecimento	°C	51	50-58
EN 12595	Viscosidade Cinemática a 135 °C	mm²/s	539 t)	≥ 370
EN 12592	Solubilidade	% (m/m)	100.0 t)	≥ 99.0
EN ISO 2592	Ponto de Inflamação (Vaso Aberto)	°C	351 t)	≥ 240
EN 12596-Anexo A	Índice de Penetração	-	-1.4	-1.5 - +0.7
EN 12593	Ponto de Fragilidade Fraass	°C	-7 t)	≤ -5
EN 12605-2	Teor em Parafinas <sup>1</sup>	% (m/m)	< 3.0 t)	≤ 4.5
<b>Endurecimento</b>				
EN 12607-1	Variação de Massa	% (m/m)	0.1 t)	-0.5 - +0.5
EN 1426	Penetração a 25°C-100g-5s, (após EN 12607-1)	%	77 t)	≥ 53
Cálculo	Aumento da Temperatura de Amolecimento	°C	3 t)	≤ 11
<b>Ensaio Adicionais</b>				
ASTM D341mod	Temperatura para viscosidade a 170 mm²/s <sup>2</sup>	°C	159 t)	A reportar
ASTM D341mod	Temperatura para viscosidade a 280 mm²/s <sup>2</sup>	°C	148 t)	A reportar


ESTE DOCUMENTO SÓ PODE SER REPRODUZIDO NA ÍNTEGRA, SALVO AUTORIZAÇÃO EXPRESSA DA ARL-LOGÍSTICA. THIS DOCUMENT MAY ONLY BE REPRODUCED IN FULL, EXCEPT WITH APPROVAL OF ARL-LOGÍSTICA.

Documento Integramente processado Informaticamente. Full computer processed document

OBSERVAÇÕES (notes):  
 t) valores típicos (typical values)  
<sup>1</sup> NPD - Desempenho não determinado (no performance determined)  
<sup>2</sup> NR - Não requerido pela norma (no requirement)

**O Responsável**

Negócio do Betumes certificado de acordo com a ISO 9001:2008

  
 0866  
 Petróleos de Portugal - Petrolgal, S.A.  
 Rua Tomás de Fompo, Torre C  
 1600-209 LISBOA  
 10  
 0866-CPD-2010/CE.0129  
 EN 12591:2009  
 Betume de pavimentação 35/50

Tempo de recepção 19. Mar. 10:19



# Anexo B – Certificado de qualidade do betume modificado PMB 45/80-65



Certificado de Qualidade



Nº de série: CQ13RM094

Tipo de produto: Betume Performance PMB 45/80-65 Lote: B13RM05/Amostra  
Local de Expedição: Rio Maior Data de emissão: 28-Mai-13  
Emitido pelo Laboratório de Probitalp  
Nº Amostra: A 2013/0298

Descrição do Produto:

Betume Modificado com Polímero

Características:

Propriedades (1)	Norma	Unidade	Classe	Valor	Valores	
					Min	Max
Ensaio sobre betume original	Penetração a 25°C, 100g, 5s	NP EN1426	0,1 mm	Classe 4	51	45 80
	Temperatura de amolecimento, A&B	NP EN1427	°C	Classe 5	70,4	65
	Ponto fragilidade Fraass	EN12593	°C	Classe 7	-17 t)	-15
	Recuperação elástica a 25°C	EN13398	%	Classe 3	91 t)	70
	Estabilidade ao armazenamento	EN13399	°C	Classe 2	4,2 t)	5
	Varição da temperatura de amolecimento ou	EN1426				
	Estabilidade ao armazenamento na penetração	EN13399 EN1427	0,1 mm	Classe 2	0 t)	9
Durabilidade depois do ensaio de envelhecimento (EN12607-1)	Ponto de inflamação	EN ISO2562	°C	Classe 3	335 t)	235
	Varição de massa	EN12607-1	%	Classe 5	-0,05 t)	1
	Penetração retica	EN1426	%	Classe 7	96 t)	60
	Aumento de temperatura de amolecimento	EN1427	°C	Classe 3	-2,6 t)	10

Observações :

1) Valor de referência

Notas:

(1) - De acordo com a Norma Europeia EN 14023:2010 - Especificações de betumes modificados com polímero.



Probitalp, SA  
Fábrica de Rio Maior  
Confirmação  
O presente CQ reproduz fielmente o respectivo ficheiro informático.  
Data: 28.05.13 Assinatura: [Assinatura]

P/O Responsável:

Probitalp  
Augusto Almeida  
28-Mai-13  
Ligantes Betuminosos, SA

Nota: Documento processado por computador. Quando enviado por via electrónica não necessita assinatura.

Probitalp - Ligantes Betuminosos, SA | Zona Industrial de Rio Maior | 2040-998 Rio Maior | 00351 243 999 240 | riomaior@probitalp.pt

Mod 0233.00

Página 1 de 1




## Anexo C – Declaração de conformidade CE do fíler NHL5




### DECLARAÇÃO DE CONFORMIDADE CE

<b>SECIL MARTINGANÇA, SA</b>	
<b>Sede:</b>	<b>Fábrica:</b>
Apartado 2 EC MACEIRA	Rua do Mercado, s/nº
2406-909 MACEIRA LRA	2405-018 MACEIRA LRA
Telef. 244 770 220 Fax 244 777 997	Telef. 244 770 220 Fax: 244 777 997
e-mail: geral@secilmartinganca.pt	
<a href="http://www.secilmartinganca.pt">www.secilmartinganca.pt</a>	

### Fíler Comercial - Cal Hidráulica Natural NHL5

 09	<b>Norma de referência:</b> NP EN 13043
	<b>Utilização prevista:</b> Agregado para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.
<b>Características</b>	
<b>Granulometria:</b>	<b>% de passado (massa)</b>
2 mm	100
0,125 mm	95 ± 5
0,063 mm	80 ± 5
<b>Teor em água</b>	≤ 1 %
<b>Finura (blaine)</b>	5000 a 6400 cm <sup>2</sup> /g
<b>Massa Volúmica do Fíler</b>	2,70 a 2,90 Mg/ m <sup>3</sup>
<b>Vazios de fíler seco compactado</b>	28/45 y
<b>Varição de temperatura anel e bola</b>	DND <sup>(1)</sup>
<b>Número de betume do fíler comercial</b>	DND <sup>(1)</sup>
<b>Solubilidade em água</b>	WS <sub>10</sub>
<b>Susceptibilidade em água</b>	DND <sup>(1)</sup>
<b>Azul de metileno</b>	MB <sub>F10</sub>
<b>Massa Volúmica aparente (querosene)</b>	0,5 a 0,9 Mg/m <sup>3</sup>
<small>(1) - desempenho não determinado (anexo ZA, secção ZA, 1 da NP EN 13043)</small>	

Certificado de Controlo de Produção da Fábrica  
1328 - CPD - 0148

**Director Geral**  
  
 Luis Goucha dos Santos

11 de Novembro de 2010

TC.E.0355/1


**SECIL MARTINGANÇA S.A.**

Apartado 2  
2406-909 MACEIRA LRA - PORTUGAL  
Tel: 244 770 220 - Fax: 244 777 997  
geral@secilmartinganca.pt  
[www.secilmartinganca.pt](http://www.secilmartinganca.pt)






## Anexo D – Declaração de conformidade CE do filer RC480



**eurocálcio**  
CALCÁRIOS E INERTES, SA

FICHA TÉCNICA DO PRODUTO Nº01 - Rev.8



**1029**

**EUROCÁLCIO - Calcários e Inertes, SA**  
Vale de Ourém, S.Mamede - Apartado 96 - 2496-908 Fátima  
Centro de Produção: Fábrica "Vale de Ourém"

06	05	05
NP EN 13043:2004 Agregados Misturas Betuminosas CCPF Nº 1029 - CPD - PT06/01944	EN 12620:2002+A1:2008 Agregados para Betão CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01472	NP EN 13139:2005 Agregados para Argamassas CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01473

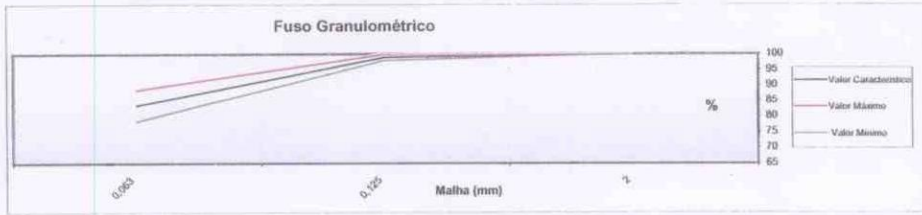
Tipo de agregado:	Filer	Refª. Normativa	EN 12620+A1	NP EN 13043	NP EN 13139
Desig. Comercial:	RC 480		Betão	Mist. Betuminosas	Argamassas
<b>REQUISITOS FÍSICOS</b>					
Qualidade dos Finos - Azul Metileno	NPEN 933-9	VD	< 1,5 MB g/kg	VD	< 1,5 MB g/kg
Massa Volumica das particulas	NPEN 1097-7	VD	2,71 Mg/m³	VD	2,71 Mg/m³
Teor de Humidade	NPEN 1097-5	VD	< 0,5 %	VD	< 0,5 %
Vazios do filer seco compactado (Rigden)	EN 1097-4		DND		DND
"Variação da temperatura anel e bola"	EN 13179-1		DND		DND
Solubilidade na Água	EN 1744-1, secção 16	VD	< 0,2%		< 0,2%
Susceptibilidade à Água	NPEN 1744-1		DND		DND
"Número de betume"	EN 13179-2		DND		DND
Superfície Específica - Método Blaine	NP EN 196-6	VD	3680 cm²/g		3680 cm²/g
Durabilidade: Reactividade Alcalis-Silica	ASTM 1260	VD	0,00%		0,00%
<b>REQUISITOS QUÍMICOS</b>					
Teor de Cloretos		VD	< 0,001%		< 0,001%
Sulfatos solúveis em ácido		C	ASo₂		ASo₂
Enxofre total	NPEN 1744-1	VD	< 0,04%		< 0,04%
Teor de húmus		VD	< LA		< LA
Contaminantes Orgânicos Leves		VD	< LA		< LA
Teor de Carbonato	CO₂	NPEN 196-21	VD	44±1%	
	CaCO₃	Cálculo	VD	99±1%	
<b>Descrição Petrográfica Simplificada</b> NP EN 932-3:2002 *R		<b>Agregado</b>	<b>Minerais</b>	<b>Forma e Angularidade</b>	<b>Condições de superfície</b>
		Fragmentos de rocha	Calcite	Estericidade Sub-prismática a sub-discoidal	Arredondamento Muito anguloso a sub-anguloso
					Rugosa

Nota: Produto obtido a partir de pedra natural, pelo que está sujeito a algumas variações (cor) resultantes do processo de formação da própria pedra.

**GRANULOMETRIA**

Malha mm	Granulometria Típica %	Tolerâncias	
		Valor Mínimo	Valor Máximo
2	100	100	100
0,125	99	98	100
0,063	83,5	78,5	88,5

**Fuso Granulométrico**



LEGENDA:

\*I Fuso Inicial


\*R Fuso Recalculado

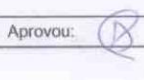
VD - valor declarado

C - categoria

LA - limite aceitação

DND - Desempenho Não Determinado

Elaborou: 

Aprovou: 

Data: 10-02-2011





## Anexo E – Declaração do LNEC quanto ao valor do volume de vazios do fíler RC48



### **LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I.P.**

Departamento de Transportes

Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias

Laboratório de Ensaio de Materiais para Pavimentação

Boletim nº 30 DT/10

Pág. 1/1

Pedido nº 1/10

Visto Eng. A.L. Macedo

**Cliente:** CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO  
Rua Coronel Veiga Simão  
Apartado 8052  
3020-901 Coimbra

**V.ª Refª :** Documento Nº 33 de 2010/01/20

### **I – IDENTIFICAÇÃO**

A amostra recebida no NIRA em 2010-01-21, e referenciada pelo requerente como “Amostra de fíler”, foi registada no LNEC/PAVMAT com o número 01/10.

### **II – ENSAIOS REALIZADOS SEGUNDO SOLICITAÇÃO DO REQUERENTE**

#### **II.1 Determinação dos vazios do fíler compactado**

O ensaio foi realizado entre 2010-01-25 e 2010-01-27 segundo a Norma Portuguesa NP EN 1097-4:2003 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 4: Determinação dos vazios do fíler seco compactado”.

#### **Resultado do ensaio:**

Amostra 01/10	
Valor médio dos volumes de vazios ( % )	32



FC/

LNEC/DT  
Av. do Brasil, 101 1700-066 LISBOA PORTUGAL  
Tel. +351. 21 844 3552 Fax. +351. 21 844 3029  
Pers. Colectiva 501 389 660

O Chefe do Laboratório de Ensaios  
LNEC/PAVMAT

Eng.ª Ana Cristina Freire

2010 -02- 12



CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO

Rua Coronel Veiga Simão Apartado 8052 3026-901 Coimbra P O R T U G A L  
(T) 351.239.499.200 (F) 351.239.499.204 (E) centro@ctcv.pt (W) www.ctcv.pt  
contn. PT 501 632 174

## DECLARAÇÃO

Parta os devidos efeitos declara-se que a “amostra de filler”, referida no Boletim nº 30 DT/10 do LNEC, corresponde ao filler RC 480 (amostra de Janeiro de 2010) da EUROCÁLCIO.

Coimbra, 04 de Março de 2010

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'J' followed by a series of loops and a final flourish.

Joaquim Valente de Almeida

Laboratório de Ensaios de Produtos

Os resultados apresentados neste trabalho referem-se apenas às amostras ensaiadas. Não se assume qualquer responsabilidade relativa à exactidão da amostragem, a menos que seja efectuada sob a directa responsabilidade do CTCV. A reprodução deste trabalho é autorizada apenas na sua forma integral. Para qualquer reprodução parcial será indispensável autorização do CTCV por escrito.